UNIVERSITÉ DE PARIS 1

MASTER SPÉCIALITÉ « CONSERVATION PRÉVENTIVE DU PATRIMOINE »

Mémento de physique appliquée

établi à l'intention des conservateurs, des régisseurs et des restaurateurs de biens culturels

« La Nature a toujours eu l'air d'un inextricable sac de nœuds, mais, à force, on y distingue des structures et on commence à édifier des théories ; un peu de clarté apparaît et les choses se simplifient. »

Richard FEYNMAN (prix Nobel 1965). – *Lumière et matière* (traduction de *QED, the Strange Theory of Light and Matter*), InterÉditions, Paris, 1987, p.192.

Pierre Diaz Pedregal

Version 3d – Novembre 2008

Sommaire

Pages

A – Lexique commenté 4

B – Compléments 87

Le tube de Torricelli et la pression atmosphérique 91

Échelles thermométriques 99

Quelques informations utiles sur les unités 102

Grandeurs et unités photométriques 106

Bibliographie commentée 109

C – Index 101

Index des notions expliquées 114

Index des traductions 119

Index des scientifiques cités 121

Mémento, mode d'emploi

CE N'EST pourtant pas la faute de la physique si la nature est compliquée ! C'est vrai qu'ils ne sont pas aisés à décrire, ces nombreux phénomènes liés au comportement thermo-hygrométrique des bâtiments en général et des édifices patrimoniaux en particulier. Il est tout aussi exact que les mécanismes qui compromettent la conservation des collections et autres biens culturels ne sont pas toujours faciles à comprendre. À cet égard, ce lexique, qui offre un choix limité de termes ou expressions utiles, sinon indispensables, constitue un effort de clarification de notions souvent délicates et dont les définitions méritent d'être rappelées.

Le sens donné aux termes du lexique peut différer, parfois sensiblement, des acceptions communes. Ainsi, une « hauteur » est ici définie comme un angle, une « frontière », comme les limites d'un système physique, etc. Par ailleurs, le lexique s'emploie à dénoncer quelques fréquentes et graves confusions : celle entre « masse » et « poids », ou encore entre « force », « puissance » et « énergie »...

Ne figurent dans ce lexique que de rares formules mathématiques, retenues pour leur beauté ou leur importance dans l'histoire de la physique. Elles ne devraient pas constituer un obstacle majeur pour les lecteurs curieux et attentifs.

Les termes en **PETITES CAPITALES GRASSES** utilisés dans les définitions renvoient à des entrées du lexique. Ceux en *caractères italiques* constituent des corrélats commentés dans le texte même de la définition ou bien dans une autre entrée qu'il est aisé de trouver en consultant l'index principal des notions placé à la fin du lexique. Celui-ci référence également les corrélats figurant en *italique* dans le texte.

Les références en gras et surlignées d'une trame grisée telles que → **Échelles thermométriques**, renvoient aux développements proposés dans les compléments placés à la suite du lexique.

Pour éviter d'alourdir la typographie, les mots « solide » et « liquide » qui constituent des entrées du lexique, ne sont jamais enrichis quand ils sont utilisés comme adjectifs. De même, aucun enrichissement n'est opéré dans les tableaux.

Lorsqu'une expression comporte un nom propre (exemples : « Forces de Van der Waals », « nombre d'Avogadro », « table de Mendeleïev », « loi de Boyle-Mariotte »), la recherche dans l'index doit s'opérer à partir du nom propre comme le montre cet exemple surligné en bleu clair :

ATOME.....9
Avogadro (Nombre d').....→ Quantité de matière
AZIMUT.....10

Lorsqu'une entrée du lexique correspond à une grandeur dimensionnée, le symbole de l'unité avec laquelle elle doit être exprimée est indiqué sous le nom de la grandeur. Les unités utilisées sont celle du système SI dont une présentation détaillée est donnée dans les compléments.

Les valeurs indiquées pour les constantes universelles sont les dernières valeurs connues (2002), arrondies à la cinquième décimale significative.

Pour faciliter la lecture d'articles ou d'ouvrages en anglais, nous proposons une traduction de toutes les entrées du lexique. On notera que si certains termes français sont au singulier, leur équivalent anglais prend le pluriel : « la physique » se traduit par « *physics* », « la thermodynamique » devient *thermodynamics*. Cette traduction est mentionnée dans la colonne de gauche. Certaines expressions n'ont pas d'équivalent direct en anglais, à notre connaissance. Nous proposons alors une traduction approchée précédée du symbole « ≈ ». Les traductions sont également reprises dans un index spécifique où elles sont classées par ordre alphabétique. Il est ainsi possible de s'y référer à la façon d'un dictionnaire.

Pour les lecteurs soucieux de rendre à César ce qui appartient à César, nous proposons un index des scientifiques cités dans ce mémento. Il est précédé de quelques commentaires.

Les illustrations identifiées par la mention « Doc. DRION & FERNET » sont tirées du vénérable ouvrage : Ch. DRION, É. FERNET. – *Traité de physique élémentaire*, 9ème édition, Masson, Paris, 1883. Lorsque l'origine de l'illustration ne nous est pas connue, le document est noté « DR » (droits réservés). Les illustrations sans mention particulière ont été créées par nous. ◘

Lexique commenté

« Les mots sont plus mystérieux que les faits. »

Pierre MAC ORLAN. – *La Petite Cloche de Sorbonne*, Gallimard, Paris, 1959.

A

ABSORPTION

Absorption

Phénomène de pénétration et de rétention d'un **FLUIDE** dans un **MATÉRIAU** par les seules forces de **CAPILLARITÉ**. Une éponge mouillée est un bon exemple de manifestation de ce phénomène. À ne pas confondre avec **A*D*SORPTION**.

Le terme d'absorption est également utilisé par les acousticiens quand ils évoquent l'atténuation d'un son provoquée par l'interaction d'une **ONDE** sonore avec la **MATIÈRE**. Cette atténuation correspond alors à un transfert d'**ÉNERGIE** entre l'onde sonore et la substance absorbante qui, en général, s'échauffe (très faiblement !).

On parle également d'absorption lors de l'interaction d'un **RAYONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE** avec la matière. Soumis à un rayonnement, une substance peut le réfléchir, le transmettre et/ou l'absorber. Le rapport de la **PUISSANCE** absorbée du rayonnement à la puissance reçue est dénommée *absorptivité*. On le note α. De même, on note τ la *transmissivité,* ou rapport de la puissance transmise à la puissance reçue, et ρ la *réflectivité*, ou rapport de la puissance réfléchie à la puissance reçue. Un rayonnement ne pouvant être que réfléchi, transmis et/ou absorbé, on a la relation évidente :

$$\alpha + \tau + \rho = 1.$$

Il est important de noter que ces propriétés d'absorptivité, de transmissivité et de réflectivité d'un matériau donné dépendent de la longueur d'onde du rayonnement électromagnétique considéré. Ainsi, un matériau peut présenter une forte transmissivité pour un rayonnement de courte longueur d'onde et par ailleurs se révéler parfaitement opaque pour un rayonnement de grande longueur d'onde. Un exemple évident est celui du verre qui est transparent dans le domaine du visible mais devient opaque pour des rayonnements de longueur d'onde supérieure à environ 3 μm. Cette sensibilité d'un matériau aux caractéristiques du rayonnement est appelée *sélectivité spectrale*.

ACIDE

Acid

Se dit d'un corps chimique, **ION** ou **MOLÉCULE**, susceptible de libérer un ion H^+ (c'est-à-dire un *proton*). Il s'en suit que tout acide contient nécessairement au moins un atome d'hydrogène. Pour autant, toutes les substances contenant de l'hydrogène ne sont pas nécessairement des acides. Ainsi, bien qu'il comporte quatre **ATOMES** d'hydrogène, le méthane CH_4 n'est pas un acide. En revanche, HCl est bien un acide. Après dissolution dans l'eau, on obtient l'équilibre ionique :

$$HCl + H_2O \leftrightarrow H_3O^+ + Cl^-.$$

C'est Svante ARRHENIUS, un chimiste suédois, connu pour la *loi* qui porte son nom sur l'activation chimique (→ **ÉNERGIE D'ACTIVATION**) qui, en 1887, proposa une théorie de la *dissociation électrolytique* et qui définit les acides et les bases comme donneurs respectivement d'ions H^+ et OH^-. Cette théorie lui valut de recevoir le

prix Nobel en 1903.

La mesure de l'*acidité* d'une **SOLUTION** est donnée par le **POTENTIEL HYDROGÈNE**. Un pH inférieur à 7 confirme l'acidité d'une solution.

ACTIVITÉ

Activity

http://www.chem.arizona.edu/~salzmanr/480a/480ants/activity/activity.html

Voir Arnaud pp. 360-362.

ACTIVITÉ DE L'EAU

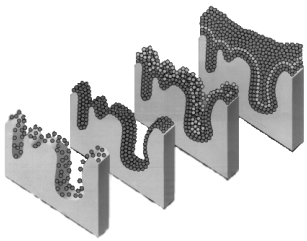
Water activity

Désigne l'**HUMIDITÉ RELATIVE** de l'environnement d'un **MATÉRIAU HYGROSCOPIQUE** lorsque les échanges de **VAPEUR** d'eau entre le matériau et son environnement ont atteint l'**ÉQUILIBRE**. L'activité de l'eau est notée a_w. Tout comme la notion plus générale d'humidité relative, l'activité de l'eau est un rapport sans **DIMENSION**. Si l'humidité relative est presque toujours exprimée en pourcentage (de 0 à 100 %), l'activité de l'eau est donnée par un nombre compris entre 0 et 1.

La notion d'activité de l'eau est surtout utilisée dans les domaines de l'agro-alimentaire, de la pharmacie et de l'industrie chimique. Les biologistes sont également amenés à l'utiliser pour décrire les conditions de développement des micro-organismes.

ADSORPTION

Adsorption



Mécanisme de physisorption sur une surface poreuse (DR).

Phénomène de piégeage d'une substance (en général un **LIQUIDE** ou un **GAZ**) dénommée l'*adsorbat* à la surface d'une autre substance (en général solide), dénommée l'*adsorbant*. Au voisinage d'une surface, une **MOLÉCULE** va être soumise aux **FORCES DE VAN DER WAALS**. Si son énergie cinétique est insuffisante, elle va être capturée par la surface. C'est l'adsorption. Le phénomène inverse porte le nom de *désorption*. On distingue :

- la *physisorption,* phénomène d'adsorption réversible faisant appel aux seules **FORCES DE VAN DER WAALS** et aux **LIAISONS HYDROGÈNE** ;
- la *chimisorption*, phénomène d'adsorption irréversible au cours duquel une véritable liaison chimique s'établit entre l'adsorbant et l'adsorbat.

ADHÉSION

Adhesion

Phénomène d'attraction entre **MOLÉCULES** de substances différentes. Lorsque les molécules appartiennent à la même substance, on parle de **COHÉSION**.

Dans le cas d'un **LIQUIDE** et d'un **SOLIDE**, si les forces d'adhésion l'emportent sur celles de cohésion, le liquide a tendance à s'étaler sur la surface du solide. On dit que le liquide *mouille* le substrat (→ **MOUILLABILITÉ**). Si les forces de cohésion l'emportent sur les forces d'adhésion, le liquide a tendance à former des gouttes. On dit que le liquide *perle* sur le substrat. En ce cas, si le liquide est de l'eau, on dit que le substrat est **HYDROPHOBE**. Si l'eau ne perle pas, si elle mouille le support, celui-ci est dit **HYDROPHILE**.

AÉROSOL

Aerosol

DISPERSION gazeuse (**SOL** gazeux). Par extension, nom attribué aux petites particules solides ou liquides en suspension dans un **GAZ**. L'expression « aérosol atmosphérique » désigne l'atmosphère en tant que mélange de gaz (*phase continue*) mêlé de particules (*phase dispersée*). Mise au pluriel (« aérosols atmosphériques »), l'expression renvoie aux *seules* particules présentes dans l'**ATMOSPHÈRE**. Le contexte évite en général toute confusion dans l'acception du terme.

Bien que les aérosols soient, la plupart du temps, invisibles à l'œil nu et représentent une très faible **MASSE** par rapport au **VOLUME** d'air qui les abrite (la concentration massique est en moyenne de 3 $\mu g/m^3$ dans les régions polaires à 100 $\mu g/m^3$ dans les déserts), ils jouent un rôle physique, chimique et biologique considérable. Ils sont à l'origine de la formation des nuages et des précipitations en tant que *noyaux de condensation*. Ils interviennent dans le bilan radiatif de l'atmosphère. Ils influencent les échanges océan – atmosphère et contribuent aux modifications de la couche d'ozone. Ils affectent largement la transparence visuelle de l'atmosphère et sont le support de la radioactivité aéroportée ainsi que des vecteurs de contaminations chimiques et microbiologiques.

Près de la surface terrestre, la concentration d'aérosols (en nombre de particules par unité de volume) est en moyenne de mille par centimètre cube au dessus des océans, de dix mille au dessus des zones rurales et de cent mille (voire au delà) dans les zones polluées (centres industriels, villes, etc.).

En zone urbaine, la taille observée des aérosols est comprise approximativement entre 0,01 µm et quelques µm. Les particules d'une taille inférieure à 0,1 µm ont une masse trop faible pour sédimenter. L'**ÉNERGIE CINÉTIQUE** reçue par l'effet des chocs des **MOLÉCULES** de **GAZ** est en effet suffisante pour les maintenir en suspension dans l'air. Ce phénomène est à rapprocher de la formation d'un **COLLOÏDE**, dispersion de particules **SOLIDES** dans un **LIQUIDE**.

Le tableau suivant liste quelques types d'aérosols en fonction de leur nature :

Nature	Aérosols
Inorganique	▪ Particules solides provenant des terres émergées : argile, sable, poussières volcaniques, etc. ▪ Particules solides et liquides provenant des océans : cristaux de sels, gouttelettes d'eau. ▪ Pollution d'origine anthropique : résidus de combustion, poussières industrielles.
Organique	▪ Graines, pollens, spores et fragments végétaux. ▪ Micro-algues et moisissures. ▪ Virus et bactéries.

AIR

Air

Nom donné à un mélange de **GAZ** constitué principalement d'azote (78 %), d'oxygène (21 %) et d'argon (1 %). À ces trois constituants s'ajoutent de nombreux autres gaz présents à l'état de traces : gaz carbonique, méthane, néon, krypton, xénon, etc.

Composant	% en volume
Azote	78,084
Oxygène	20,9476
Argon	0,934
Dioxyde de carbone	0,0314
Néon	0,00182
Hélium	0,00052
Méthane	0,00015
Dioxyde de soufre, hydrogène, krypton, xénon…	

Sa composition chimique étant pratiquement invariable, l'air est souvent considéré comme un gaz homogène de **MASSE MOLAIRE** moyenne égale à 29 g/mol. Par opposition à l'expression « **AIR HUMIDE** », on utilise fréquemment l'appellation *air sec* pour dénommer l'air atmosphérique privé de **VAPEUR** d'eau.

AIR HUMIDE

Humid air, moist air

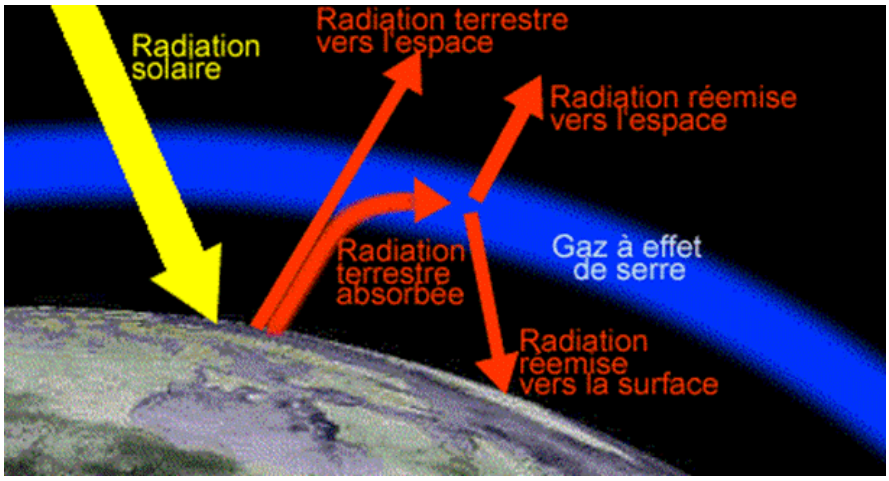
Mélange en proportion variable d'**AIR** sec et de **VAPEUR** d'eau. Selon les régions du monde et les saisons, la proportion de vapeur d'eau dans l'**ATMOSPHÈRE** varie de 0,5 % (climat désertique) à 5 % (climat tropical humide). La **CHALEUR LATENTE** associée à la vapeur d'eau va considérablement influencer les propriétés thermodynamiques du mélange. Ces propriétés telles que la **MASSE VOLUMIQUE**, le **RAPPORT DE MÉLANGE**, l'**ENTHALPIE** sont calculables mais il est plus simple d'utiliser un **DIAGRAMME PSYCHROMÉTRIQUE** pour les déterminer.

ATMOSPHÈRE

Atmosphere

Enveloppe gazeuse entourant certaines planètes dont la Terre. Composée essentiellement d'**AIR** et de **VAPEUR** d'eau auxquels de mêlent de nombreux **AÉROSOLS**, l'atmosphère est le siège de nombreux phénomènes physico-chimiques qui influencent considérablement le climat. Baptisés **MÉTÉORES**, ces phénomènes ont une origine naturelle et ont pour moteur l'**ÉNERGIE** solaire reçue par notre planète. Cependant, l'influence des activités humaines devient de plus en plus perceptible. Les trois principales sources de perturbations anthropogéniques sont la génération de polluants gazeux, de chaleur et de poussières. Les premières conséquences sont d'ores et déjà mesurables et se manifestent sous la forme notamment d'un réchauffement de l'atmosphère.

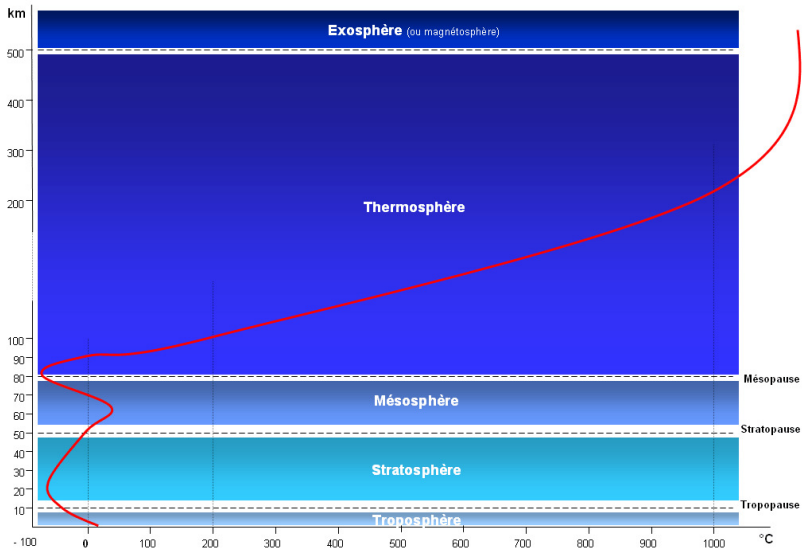
En interaction forte et permanente avec les océans, les terres émergées et le **RAYONNEMENT** du Soleil, l'atmosphère joue un rôle très complexe de filtre entre la Terre et l'espace.



Échanges radiatifs à travers l'atmosphère (DR).

De nombreux calculs se réfèrent à l'*atmosphère standard*. Cette expression désigne un état de référence de l'atmosphère rapporté au niveau de la mer et correspondant aux valeurs suivantes :

- **TEMPÉRATURE** : 15 °C.
- **PRESSION** : 101 325 Pa.
- **MASSE VOLUMIQUE** : 1,225 kg/m^3.



La figure précédente représente une coupe verticale de l'atmosphère. La courbe rouge indique l'évolution de la température de l'atmosphère en fonction de l'altitude indiquée par l'échelle latérale. L'essentiel des phénomènes météorologiques qui nous intéressent se produisent dans la première couche nommée *troposphère* qui se développe entre la surface terrestre et l'altitude approximative de 10 km.

ATOME

Atom

Plus petite quantité de **MATIÈRE** constitutive d'un corps simple. L'ordre de grandeur du rayon d'un atome est de 10^{-10} m (soit un ångström). Électriquement neutre, un atome est constitué d'un noyau formé de *protons* (porteurs d'une charge électrique) et de *neutrons*

(neutres comme leur nom l'indique), entouré d'un nuage d'*électrons*. Le noyau est environ 10 000 fois plus petit que l'atome ! L'hydrogène est le seul **ÉLÉMENT** connu dont le noyau ne comporte aucun neutron. Protons et neutrons sont collectivement désignés par l'expression *nucléons*. Il y a toujours autant d'électrons (charges négatives) que de protons (charges positives). Les protons et les neutrons sont eux-mêmes formés de particules plus élémentaires encore, les *quarks*. La cohésion de ce nanomonde est assurée par l'une des quatre **FORCES FONDAMENTALES** de l'Univers, l'*interaction forte*.

Le nombre de protons (et donc d'électrons) d'un atome est appelé *numéro (*ou *nombre) atomique* et est noté *Z*. Le nombre de neutrons est noté *N*. Une convention d'écriture permet de désigner n'importe quel *nucléide* (ensemble des atomes ayant le même nombre de protons et le même nombre de neutrons) sous la forme : ${}^{Z+N}_{Z}\mathrm{X}$, où X est le symbole de l'élément. Exemple : l'or est noté ${}^{197}_{79}\mathrm{Au}$. On désigne par A la somme $Z + N$. A est dénommé *nombre de masse*.

On appelle *isotope* d'un élément, un nucléide possédant le même nombre de protons que l'élément de référence mais un nombre différent de neutrons. Ainsi, ${}^{14}_{6}\mathrm{C}$ (on prononce « carbone 14 ») désigne un important isotope du carbone ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$ utilisé dans une méthode de datation des objets archéologiques.

Un peu plus de 90 corps simples ont été découverts. Ils sont nommés éléments. Il est frappant de réaliser que l'Univers, dans sa totalité, n'est composé que de moins d'une centaine de substances élémentaires. Ces éléments sont répertoriés dans un tableau connu sous le nom de *tableau périodique des éléments*, ou *table de Mendeleïev*, du nom du génial chimiste russe, Dmitri Ivanovitch MENDELEÏEV, qui l'a établie. Une trentaine d'autres corps ont été créés artificiellement mais les noyaux de ces corps sont instables et se désintègrent rapidement sous l'effet d'un phénomène nommé **RADIOACTIVITÉ**. On les appelle *transuraniens* car leur nombre atomique est supérieur à celui de l'uranium ($Z = 92$).

Une caractéristique importante de chaque élément est sa *masse atomique relative* dont l'unité s'écrit avec le symbole « u ». On pose par ailleurs la conversion $\mathrm{u} = 1{,}66054 \cdot 10^{-27}$ kg. En 1960, les physiciens s'accordèrent pour attribuer la valeur 12 u exactement à la masse atomique relative de l'isotope 12 du carbone (^{12}C). Mais les éléments naturels ne sont pas tous constitués d'un même isotope. Ainsi l'oxygène naturel est un mélange de ^{16}O, ^{17}O et ^{18}O. Pour déterminer la masse atomique relative d'un élément naturel, on calcule une moyenne pondérée des masses atomiques de chaque isotope de l'élément, au prorata de leur abondance relative. Prenons l'exemple du chlore. On lui connaît pas moins de 19 isotopes. Seuls deux d'entre eux sont stables et ce sont eux qui constituent ensemble ce qu'il est convenu d'appeler le chlore naturel : ^{35}Cl et ^{37}Cl. Le premier a une masse de 35,969 u et une abondance relative de 75,77 %. La masse atomique relative du second est de 36,966 u et son abondance relative de 24,23 %. Un calcul élémentaire permet d'obtenir une masse atomique relative de 35,453 u pour le chlore naturel. La mole ayant été

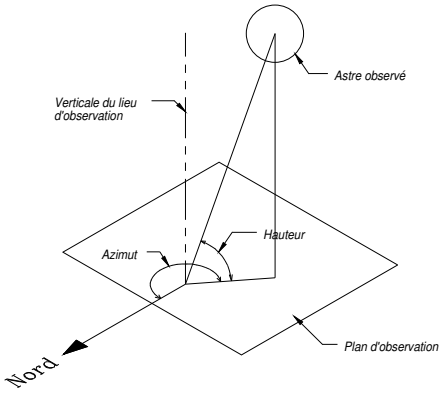
définie en 1969 comme la **QUANTITÉ DE MATIÈRE** d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 12 g de carbone 12, il s'ensuit que le nombre représentant la masse atomique relative d'une substance exprime également sa **MASSE MOLAIRE** ! Avec l'exemple précédent, il vient :

Masse atomique relative du chlore..... 35,453 u.
Masse molaire du chlore..... M_{Cl} = 35,453 g/mol.

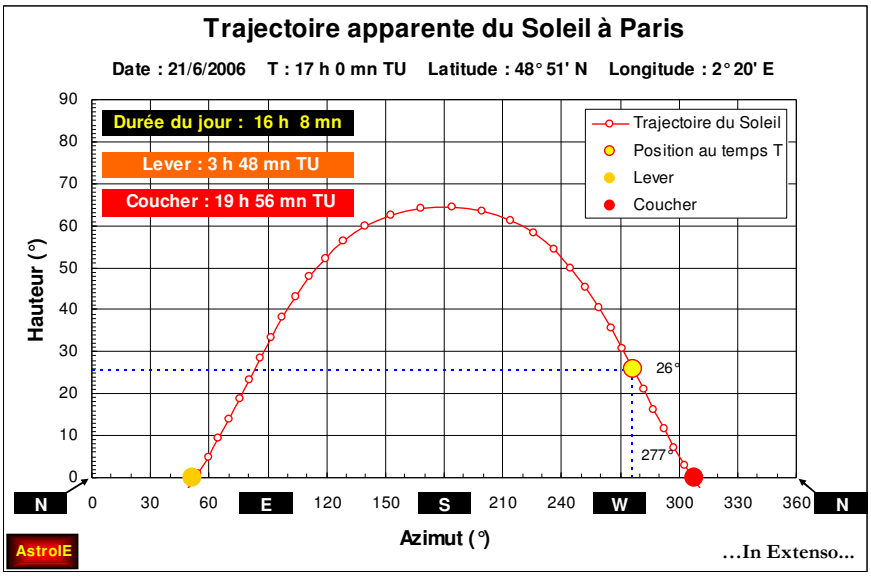
Il est aisé de vérifier que la masse atomique relative du carbone naturel telle qu'elle apparaît dans la *table de Mendeleïev* n'est pas exactement 12. La valeur donnée est 12,011 u. En effet, le carbone naturel contient des isotopes autres que ^{12}C.

AZIMUT
o
Azimuth

Angle formé par le plan vertical passant par un astre et le plan méridien du lieu d'observation. L'angle est compté soit par rapport au sud (l'azimut du sud vaut 0°, il est négatif vers l'est, positif vers l'ouest), soit par rapport au nord (l'azimut vaut alors 90° à l'est, 180° au sud, etc.). Combiné avec la **HAUTEUR**, l'azimut permet de situer précisément la position apparente d'un astre sur la voûte céleste. L'azimut d'un astre, comme la hauteur, dépend du mois, du jour et de l'heure, ainsi que des coordonnées géographiques (latitude et longitude) du point d'observation.



Le graphe suivant illustre l'utilisation de la notion d'azimut et de hauteur pour la représentation de la trajectoire apparente du Soleil à Paris lors du solstice d'été. Les heures sont données en temps universel (d'où la mention TU). Dans l'exemple que nous avons choisi, les coordonnées du Soleil sont figurées pour 17 heures (TU). On note que l'azimut de notre étoile est alors de 277° et la hauteur de 26°. Ceci prouve qu'une partie de l'année (entre les équinoxes de printemps et d'automne), le Soleil est en mesure, à certains moments de la journée, d'éclairer une façade nord ! Placer des œuvres fragiles dans des pièces orientées au nord ne garantit donc pas que ces œuvres ne seront pas touchées par le rayonnement solaire… Au demeurant, le risque est d'autant plus significatif que le Soleil étant alors bas sur l'horizon, son rayonnement peut pénétrer profondément dans les bâtiments au travers des baies vitrées.


Trajectoire apparente du Soleil à Paris
Date : 21/6/2006 T : 17 h 0 mn TU Latitude : 48° 51' N Longitude : 2° 20' E
Durée du jour : 16 h 8 mn
Lever : 3 h 48 mn TU
Coucher : 19 h 56 mn TU
Trajectoire du Soleil
Position au temps T
Lever
Coucher
Hauteur (°)
26°
277°
N 0 30 60 E 120 150 S 210 240 W 300 330 360 N
Azimut (°)
AstrolE
…In Extenso...

B

BASE

Base

Se dit d'un corps chimique, **ION** ou **MOLÉCULE**, susceptible de recevoir un ion H^+ (c'est-à-dire un *proton*) ou de libérer un ion OH^- (*ion hydroxyle*). Une base possède donc nécessairement un doublet libre d'*électrons* sur lequel l'ion hydrogène peut se lier.

La mesure de la *basicité* (ou *alcalinité*) d'une **SOLUTION** est donnée par le **POTENTIEL HYDROGÈNE**. Un pH supérieur à 7 confirme la basicité d'une solution.

BROUILLARD

Fog

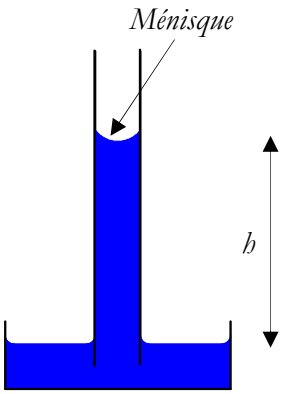
AÉROSOL de gouttelettes d'eau dans une masse d'**AIR HUMIDE** saturée en contact avec le sol naturel. Un tel aérosol est appelé **NUAGE** s'il est détaché de la surface du sol. La formation de brouillard peut résulter de différents phénomènes : mélange d'air chaud et humide avec de l'air très froid, **CONDENSATION** de la **VAPEUR** d'eau au sein d'une masse d'air humide au contact d'un sol froid, etc.

C

CAPILLARITÉ

Capillarity

Phénomène d'ascension d'un **LIQUIDE** dans un tube très fin (*capillaire*). Il est dû à l'existence d'une **TENSION SUPERFICIELLE** du liquide en contact avec la paroi du tube capillaire. La hauteur h atteinte par un liquide dans un tube capillaire est proportionnelle à la tension de surface de ce liquide et inversement proportionnelle au rayon du tube. Ce beau résultat a été établi au XVIII^e siècle par un médecin britannique, James JURIN qui a laissé son nom à la loi qu'il a établie (*loi de Jurin*). La force F qui résulte de la tension de surface équilibre le poids de la colonne d'eau h. Avec de l'eau et un tube de 2 mm de diamètre, h est égal à 29 mm.



Le *ménisque* (courbure de la surface) formé au contact du liquide et de la paroi du tube et de celle du récipient, dépend à la fois de la tension de surface du liquide et de l'adhésion du liquide à la surface du substrat. L'angle formé par le liquide et la paroi dépend de la capacité du liquide à « mouiller » son récipient (→ **MOUILLABILITÉ**). Lorsque la tension de surface l'emporte sur les forces d'adhésion à la paroi, le ménisque est convexe (cas le plus courant pour les liquides). Dans le cas inverse, le ménisque est concave (cas notamment du mercure).

La capillarité joue un rôle considérable dans l'humidification des sols à partir d'une nappe phréatique. L'ascension de cette humidité peut se poursuivre dans les murs d'une construction en entraînant des sels dissous. La cristallisation ultérieure de ces sels peut provoquer d'importants désordres dans les matériaux poreux.

CATALYSEUR

`Catalyst`

Substance favorisant une **RÉACTION CHIMIQUE** sans subir elle-même de transformation permanente. Le catalyseur n'apparaît donc pas dans l'équation de la réaction, ni du côté des réactifs, ni du côté des produits. Son rôle est principalement de réduire l'énergie d'activation nécessaire à la réaction. La réaction peut donc démarrer à plus basse température et se dérouler plus rapidement.

Un catalyseur est dit *homogène* lorsqu'il se trouve dans un **ÉTAT** identique à celui des réactifs (solide, liquide ou gaz), se combine avec eux dans un premier temps de la réaction puis est régénéré dans un second temps de telle sorte qu'il n'apparaisse pas dans le bilan de la réaction.

Un catalyseur est dit *hétérogène* quand il est dans un état différent des réactifs auxquels il sert de support. La plupart des catalyseurs hétérogènes sont des solides à la surface desquels les réactifs se fixent par adsorption (exemple du pot catalytique des automobiles permettant de transformer les polluants présents dans les gaz d'échappement). Dotés d'une grande surface spécifique, ces catalyseurs affaiblissent les liaisons chimiques des réactifs et favorisent la formation des produits.

La destruction de certaines molécules organiques (comme la cellulose) est favorisée par certaines protéines spécialisées nommées *enzymes*. Ainsi, une hydrolyse enzymatique de la cellulose permet de produire de l'éthanol. L'enzyme concernée apparaît ainsi comme un véritable catalyseur.

CHALEUR

J

`Heat`

Une des apparences de l'**ÉNERGIE**. L'échange de chaleur entre un corps et son environnement provoque soit une élévation (ou diminution) de **TEMPÉRATURE**, soit un **CHANGEMENT D'ÉTAT**. Dans le premier cas on parle de **CHALEUR SENSIBLE** et dans le second de **CHALEUR LATENTE**. La chaleur d'un corps, souvent appelée *énergie thermique*, n'est rien d'autre que la forme macroscopique de l'**ÉNERGIE CINÉTIQUE** des **MOLÉCULES** qui le constituent.

CHALEUR LATENTE

J

Latent heat

Quantité de **CHALEUR** échangée entre un milieu et un corps pur lors d'un **CHANGEMENT D'ÉTAT**. Elle ne provoque alors aucune élévation de **TEMPÉRATURE**, l'**ÉNERGIE** en jeu étant intégralement absorbée sous forme d'**ÉNERGIE CINÉTIQUE** des **MOLÉCULES** constituant la substance. S'oppose à **CHALEUR SENSIBLE**.

Cette quantité de chaleur est variable en fonction de la nature de la substance, de sa **MASSE** et des conditions de **PRESSION** et de **TEMPÉRATURE** sous lesquelles se produit le changement d'état.

Prenons un exemple. Porté préalablement à 100 °C, sous *pression atmosphérique normale*, un kilogramme d'eau doit absorber 2 257 kJ pour être totalement vaporisé. Pendant ce temps, la température demeurera constante. Inversement, la liquéfaction d'un kilogramme de vapeur restituera intégralement les 2 257 kJ absorbés lors de la phase de **VAPORISATION**. Par comparaison, on notera qu'il n'aura fallu que 419 kJ pour porter un kilogramme d'eau de 0 °C à 100 °C, soit 5,4 fois moins !

CHALEUR MASSIQUE

J/(kg · °C)

Specific heat

Quantité de **CHALEUR** qui doit être fournie à un kilogramme d'une substance pour élever sa **TEMPÉRATURE** d'un degré Celsius. On la nomme également *capacité thermique* ou encore *capacité calorifique.*

Voici quelques valeurs indicatives de chaleurs massiques :

- Or .....130 J/(kg · °C)
- Argent .....235 J/(kg · °C)
- Cuivre.....390 J/(kg · °C)
- Acier.....500 J/(kg · °C)
- Granit.....800 J/(kg · °C)
- Brique.....840 J/(kg · °C)
- Aluminium.....900 J/(kg · °C)
- Air.....1 000 J/(kg · °C)
- Bois.....1 700 J/(kg · °C)
- Eau.....4 200 J/(kg · °C)

CHALEUR SENSIBLE

J

Sensible heat

Quantité de **CHALEUR** reçue ou restituée par un corps, se traduisant respectivement par une élévation ou une diminution de sa **TEMPÉRATURE**. S'oppose à **CHALEUR LATENTE**.

CHAMP

Field

Domaine matériel ou immatériel où se manifeste, en tout point, une propriété physique particulière caractérisée par une **GRANDEUR** *scalaire* (**PRESSION**, **TEMPÉRATURE**, etc.) ou *vectorielle* (**PESANTEUR**, vitesse, etc.). Mathématiquement parlant, un champ est représenté par une fonction décrivant la grandeur physique concernée en tout point de l'espace. Pour les *champs scalaires*, la grandeur est représentée en tout point par un *scalaire*, c'est-à-dire un nombre unique. Pour les *champs vectoriels*, la grandeur est représentée par un *vecteur*, c'est-à-dire l'association d'un nombre et d'une direction. Tout **SYSTÈME** physique peut donc être représenté par un plusieurs champs superposés

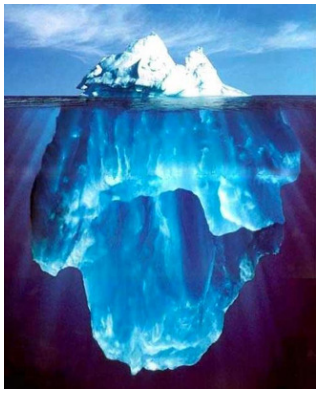
Représentation d'un champ vectoriel 2D

représentant ses grandeurs caractéristiques.

Deux familles de champs vectoriels ont une importance particulière : il s'agit des champs électriques et magnétiques dont l'interaction est à l'origine de tout **RAYONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE**. Ces champs sont totalement décrits par un jeu d'équations proposé en 1873 par le brillantissime physicien écossais James MAXWELL (1831-1879). Soit dit en passant, c'est ce même MAXWELL qui a défini la **LUMIÈRE** comme une onde électromagnétique.

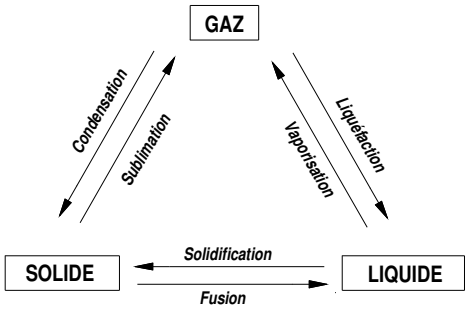
CHANGEMENT D'ÉTAT

Change in phase (or state)



Petit glaçon dans un grand verre d'eau (DR).

Passage d'un **ÉTAT** de la **MATIÈRE** à un autre. On dit aussi *transition de phase*. Tous les corps chimiquement purs peuvent exister sous trois états fondamentaux : la **PHASE** solide, la phase liquide, la phase gazeuse, compte non tenu de l'état de *plasma*. Dans certaines conditions de **PRESSION** et de **TEMPÉRATURE**, deux, voire trois états, peuvent coexister. Ces différentes phases correspondent à des niveaux d'organisation distincts de la matière. La phase solide correspond à l'état le plus organisé tandis que la phase gazeuse correspond à l'état le plus chaotique. Au fur et à mesure que de l'**ÉNERGIE** est fournie à une substance, son agitation moléculaire s'accroît. À partir d'un certain seuil, l'**ÉNERGIE CINÉTIQUE** des **MOLÉCULES** est suffisante pour rompre l'équilibre des **FORCES** de **COHÉSION** du solide. Le **SOLIDE** va donc progressivement changer d'état et devenir liquide. Pour une pression donnée, tant que le solide n'aura pas totalement fondu, les deux phases vont coexister et la température du système demeurera constante, si la substance est pure. L'exemple emblématique de cette situation est le glaçon dans un verre d'eau. Si l'apport de chaleur se poursuit, le **LIQUIDE** va monter en température. À partir d'un certain seuil, un nouveau changement d'état va se produire. Le liquide va devenir un **GAZ**. Ces phénomènes *endothermiques* (c'est-à-dire qui absorbent de la chaleur) sont à l'origine de la sensation de fraîcheur qui accompagne l'évaporation de l'eau sur la peau. La régulation thermique sudorale est fondée sur cette propriété des changements d'état.

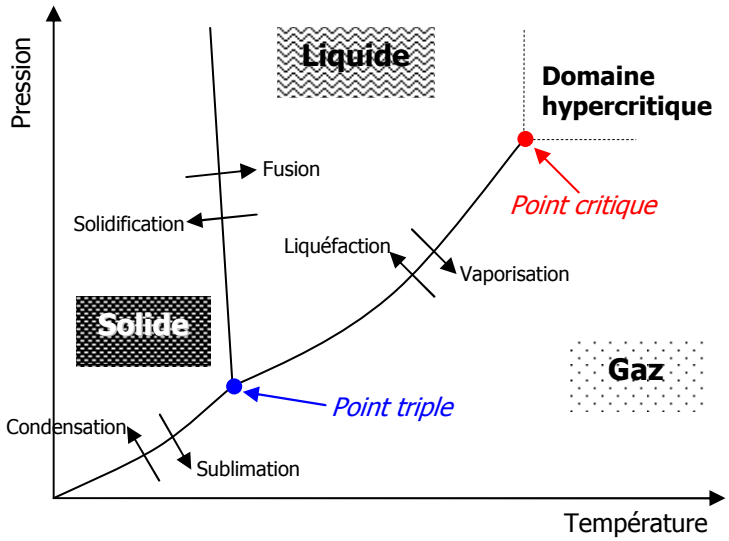


Les termes indiqués dans l'illustration sont les appellations « physiquement correctes ». L'usage courant (et admis) remplace fréquemment l'expression « liquéfaction » par « condensation liquide », voire « condensation » tout court. Nous nous conformerons à cet usage quand il n'y aura pas de risque de confusion.

Pour provoquer le passage de la phase solide à la phase liquide, puis de la phase liquide à la phase gazeuse, il a fallu fournir de l'énergie stockée

sous forme d'énergie cinétique des molécules de la substance (**CHALEUR LATENTE**). Le changement d'état inverse est un processus cette fois-ci *exothermique* qui restitue intégralement la chaleur latente absorbée. Ce mécanisme fondamental des changements d'état est mis à profit dans de nombreuses installations techniques pour le transfert ou le stockage énergétique.

Le passage du solide au gaz ne se fait pas obligatoirement par la phase liquide. Sous certaines conditions de pression et de température, un solide peut se sublimer directement en gaz tandis qu'un gaz, à l'inverse, peut se condenser directement en solide.



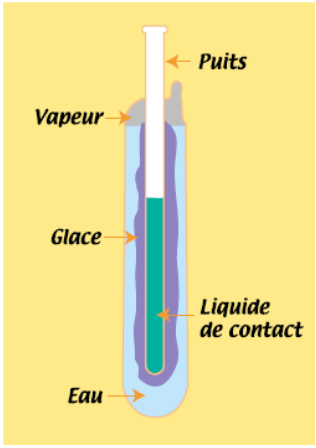
Appelé *diagramme de phases*, la figure précédente illustre les conditions de température et de pression nécessaire à l'existence d'un état pour un corps pur.

Sur ce graphe, les lignes continues représentent les conditions d'**ÉQUILIBRE** entre deux phases. Ainsi, la courbe d'équilibre entre la phase gazeuse et la phase liquide n'est rien d'autre que la représentation de la **PRESSION DE VAPEUR SATURANTE** en fonction de la température.

Deux points singuliers sont représentés sur le graphe précédent : le *point triple* et le *point critique*.

Au *point triple*, les trois états fondamentaux peuvent coexister à l'équilibre. Pour une substance pure donnée, il ne peut exister qu'un seul point triple dont les coordonnées en température et pression sont toujours parfaitement définies. C'est la raison pour laquelle les points triples (comme celui de l'eau) sont utilisés comme étalons de température.

Le *point critique* constitue une limite supérieure pour la courbe d'équilibre entre la phase liquide et la phase vapeur. Au-delà de ce point, on pénètre dans le *domaine hypercritique* où il n'existe plus de transition franche entre liquide et gaz, phases qu'il n'est alors plus possible de distinguer.



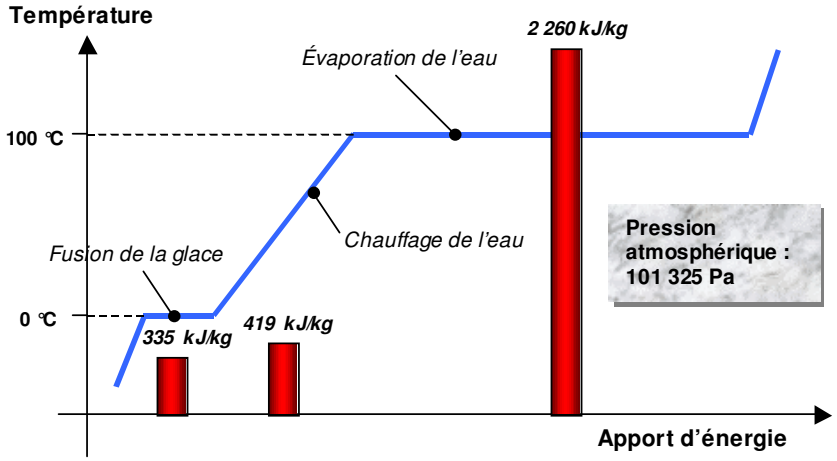
Cellule point triple de l'eau. La cellule est réalisée en verre borosilicaté. On ajoute un liquide de contact conducteur pour faciliter l'équilibre thermique du thermomètre testé placé dans le puits central. L'incertitude de mesure est de l'ordre de ± 0,001 °C. (Doc. Metrix)

Le tableau suivant donne les points triples et les points critiques de quelques corps purs.

Substance	Point triple θ_t (°C)	Point triple p_t (Pa)	Point critique θ_c (°C)	Point critique p_c (Pa)
H_2	– 259,3	$7{,}2 \cdot 10^3$	– 240	$1{,}3 \cdot 10^6$
CO_2	– 56,6	$0{,}52 \cdot 10^6$	31	$7{,}4 \cdot 10^6$
Hg	– 38,83	$2 \cdot 10^{-4}$		
H_2O	0,01	612	374	$22{,}1 \cdot 10^6$

[Source : D. Lide. – *Handbook of Chemistry and Physics*, CRC Press, New York 78th ed., 1997]

Le graphe ci-après indique les quantités d'énergie mise en jeu lors des principaux changements d'état de l'eau à la *pression atmosphérique normale*.



CHIMIE

Chemistry

Étude des **ÉLÉMENTS** constitutifs de la **MATIÈRE**, de leur association et de leur transformation au cours de processus complexes dénommés **RÉACTIONS**. À l'instar de la **PHYSIQUE** dont elle constitue une branche, la chimie comporte de nombreuses sous-disciplines dont les principales sont la *biochimie* (chimie du vivant), la *chimie physique* (dite aussi *chimie générale*, consacrée à l'étude de la structure de la matière et des conditions fondamentales régissant les réactions chimiques), la *chimie organique* (chimie des composés du carbone), la *chimie minérale* (chimie des composés de tous les autres éléments), la *thermodynamique chimique* (étude des échanges énergétiques propres aux réactions chimiques).

Il importe de rappeler que la chimie repose sur une seule des quatre **FORCES FONDAMENTALES** connues dans l'Univers, l'*interaction électromagnétique*.

CLIMAT

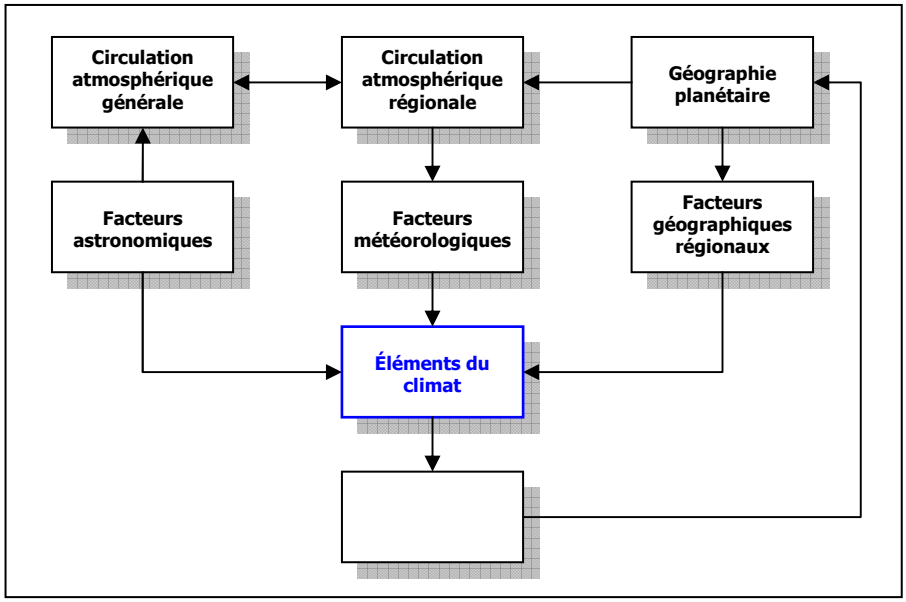
Climate

Valeur moyenne sur une période suffisamment longue des paramètres physiques qui caractérisent l'état de l'**ATMOSPHÈRE** en un lieu donné. Les principaux paramètres caractérisant le climat d'un lieu sont les suivants :

- **TEMPÉRATURE** et **HUMIDITÉ** de l'air ;

- ensoleillement ;
- précipitation ;
- nébulosité ;
- vitesse et direction du vent ;
- **PRESSION ATMOSPHÉRIQUE**.

Le schéma suivant (d'après A. Hufty) illustre la complexité des facteurs affectant la formation du climat d'un lieu.



CLIMATOLOGIE

Climatology

Étude des échanges énergétiques et hydriques entre la surface de la Terre et l'atmosphère. Cette étude inclut l'analyse de la fréquence et de la succession des évènements météorologiques constitutifs des différents **CLIMATS**. Elle revêt donc un aspect statistique et dynamique. Elle peut s'étendre aux conséquences des évènements climatiques sur la biosphère.

COHÉSION

Cohesion

FORCE qui unit entre elles les **MOLÉCULES** d'un corps solide ou liquide. Cette force a pour origine l'interaction des charges électriques des molécules et l'**ÉQUILIBRE** des forces attractives et répulsives (**FORCES DE VAN DER WAALS**) qui en découle. Ce sont les forces de cohésion qui donnent aux **LIQUIDES** leur unité de phase.

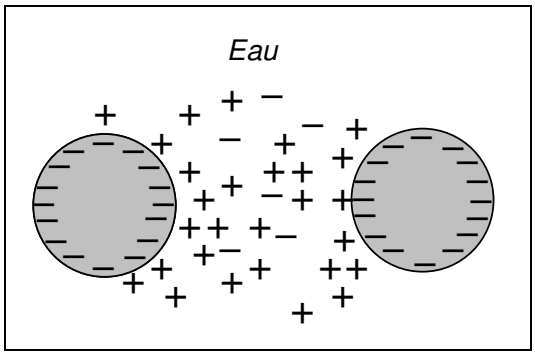
COLLOÏDE

Colloids

DISPERSION de particules solides (*phase dispersée*) dans un **LIQUIDE** (*phase continue*). Le terme est parfois utilisé dans un sens beaucoup plus large incluant toutes les formes de dispersion. Nous nous limitons ici au sens strict. Ces particules sont des agrégats de **MOLÉCULES**, voire des macromolécules isolées. Soumises à la pesanteur, ces particules solides ont, *a priori*, tendance à sédimenter dans le liquide où elles sont dispersées. Mais, par ailleurs, sous l'effet du **MOUVEMENT BROWNIEN**, ces particules sont animées d'une vitesse de déplacement non nulle. Lorsque la composante verticale de cette vitesse est au

moins égale à la vitesse de sédimentation, les particules demeurent en suspension. On appelle *limite colloïdale* le rayon des particules correspondant à l'équilibre des vitesses indiquées plus haut. Dans l'eau, cette limite est de l'ordre de 1 μm.

Dans la plupart des cas, les colloïdes ont une charge électrique de surface. La répulsion électrostatique qui s'exerce entre particules de charge identique, empêche alors la *floculation*. La floculation est un phénomène physico-chimique au cours duquel les matières en suspension s'agrègent en flocons. La solution perd alors sa stabilité et les particules initialement en suspension sédimentent.



Deux particules chargées en interaction électrostatique dans de l'eau.

Pour éviter cette floculation, lorsqu'elle est indésirable, les chimistes ont mis au point des techniques spécifiques consistant notamment à permettre l'adsorption de molécules tensioactives à la surface des particules en solution. Un bon exemple est offert par l'encre de Chine constituée de particules de noir de carbone dispersées dans de l'eau et stabilisées par un **POLYMÈRE** hydrosoluble, la gomme-laque.

COMPOSÉ ORGANIQUE

Organic compound

Substance contenant au moins un atome de carbone. De fait, quelques composés simples du carbone ne sont pas considérés comme des composés organiques : c'est le cas notamment des oxydes du carbone (CO et CO_2), des carbonates (comme le carbonate de calcium $CaCO_3$) ou des carbures (tel que le carbure de calcium $CaCO_2$). En revanche, les hydrocarbures (molécules ne contenant que les seuls éléments C et H, comme CH_4, le méthane, le plus simple des composés organiques) sont considérés comme des substances organiques. La branche de la chimie qui étudie les composés organiques est nommée *chimie organique*. Jadis, cette expression désignait l'étude des molécules des organismes vivants (végétaux ou animaux), d'où le nom donné à la discipline. On l'opposait alors à la *chimie minérale* qui traitait toutes les autres substances inertes.

Dans la protection des collections patrimoniales, il faudra souvent lutter contre des *composés organiques volatils* souvent désignés par l'acronyme *COV*. Il s'agit de composés organiques naturellement gazeux aux pressions et températures ordinaires. Bien qu'il s'agisse d'une molécule organique (*cf. supra*), le méthane n'est pas considéré comme un COV.

CONDENSATION

Condensation

Deposition

Au sens strict, passage d'une substance de l'**ÉTAT** de **GAZ** à l'état solide (→ **CHANGEMENT D'ÉTAT**). On utilise également ce terme pour le passage de l'état gazeux à l'état liquide. Pour éviter toute confusion, il peut être parfois utile de parler de *condensation solide* ou de *condensation liquide*. Dans tous les cas, la condensation est un processus *exothermique* qui restitue la **CHALEUR LATENTE** emmagasinée par la substance quand elle est passée à l'état gazeux, soit directement à partir de l'état solide (**SUBLIMATION**), soit à partir de la phase liquide (**VAPORISATION** ou **ÉVAPORATION**).

Si l'on tente d'ajouter de la **VAPEUR** d'eau à une **MASSE** d'**AIR HUMIDE** saturée, l'excès de vapeur d'eau se condensera sous forme de gouttelettes d'eau, soit sur les surfaces en contact avec la masse d'air humide, si elles sont plus froides, soit dans la masse d'air elle-même avec laquelle elle formera un **BROUILLARD**.

Une condensation se produira également si l'on tente de refroidir une certaine masse d'air humide en deçà de sa **TEMPÉRATURE DE ROSÉE**.

CONDITIONS AUX LIMITES

Boundary conditions

Sollicitations supportées par un **SYSTÈME** à sa **FRONTIÈRE**. En général, ces conditions sont des **TEMPÉRATURES** ou des **FLUX** d'énergie ou de matière. Elles peuvent être constantes ou variables. Ce sont elles qui déterminent le **RÉGIME** auquel est soumis le système.

Supposons que notre système étudié soit une vitrine placée dans une salle d'exposition. Pour faciliter l'étude, nous choisirons les faces extérieures de la vitrine comme étant la frontière du système. Définir les conditions aux limites consistera à 1) établir la liste de tous les flux matériels (**AIR**, **HUMIDITÉ**, **AÉROSOLS**, etc.) et immatériels (**RAYONNEMENTS**, vibrations, etc.) qui traversent la frontière dans un sens ou un autre, 2) connaître l'intensité de ses flux et leurs éventuelles fluctuations. Si ces flux sont constants, le régime sera dit **STATIQUE** ou encore **PERMANENT**. L'étude en sera facile. Si les flux sont variables dans le temps, le régime sera dit **DYNAMIQUE**. L'étude en sera beaucoup plus complexe.

CONDITIONS NORMALES

Standard temperature and pressure

Expression définissant la situation d'un **SYSTÈME** soumis simultanément à une *température normale* égale à 0 °C et à une *pression normale* égale à 101 325 Pa. Les expressions *température normale* et *pression normale* peuvent être utilisées seules lorsque la contrainte complémentaire ne s'applique pas.

En anglais, l'expression *standard temperature and pressure* est souvent notée « *s.t.p.* ». Elle remplace l'ancienne notation « *n.t.p.* » (*normal temperature and pressure*).

CONDUCTION

Conduction

Phénomène de transfert de **CHALEUR** à l'intérieur d'un milieu matériel, lié à la propagation plus ou moins rapide de l'agitation moléculaire de la zone la plus chaude du corps vers la zone la plus froide. Ce phénomène tend à uniformiser la **TEMPÉRATURE** du milieu matériel considéré. La vitesse du transfert conductif est liée à une caractéristique physique du **MATÉRIAU**, sa *conductivité thermique* exprimée en W/(m · °C). Celle-ci, en toute rigueur, dépend de la

Jean-Baptiste Joseph Fourier (DR).

température. Dans le domaine des transferts thermiques affectant les bâtiments, la plage des températures en jeu est suffisamment restreinte pour qu'il soit possible de considérer la conductivité thermique comme constante. C'est le physicien et mathématicien français Jean-Baptiste Joseph FOURIER qui, le premier, en 1822, a proposé une loi phénoménologique établissant que le **FLUX** de chaleur traversant un matériau était proportionnel au **GRADIENT** de température existant dans le matériau et à sa conductivité thermique. La fameuse *loi de Fourier* s'écrit (en mono-dimensionnel) :

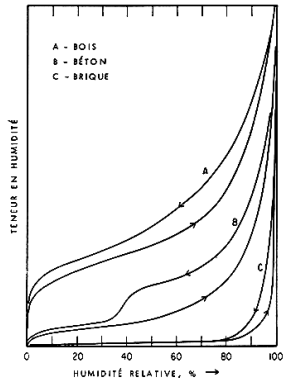
$$q = -\lambda \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x},$$

où q est la *densité de flux* de chaleur en W/m², λ est la conductivité thermique du matériau et $\mathrm{d}T/\mathrm{d}x$ est le gradient local de température. En **RÉGIME PERMANENT**, le gradient de température est égal à l'écart de température entre les deux faces d'un **SOLIDE** divisé par l'épaisseur du solide. Dans la relation précédente, le signe moins indique que le sens du flux de chaleur est compté positivement lorsque la température décroît.

CONTENU EN EAU

Water (or moisture) content

Rapport de la **MASSE** d'eau retenue par **ABSORPTION** ou par **ADSORPTION** dans un **MATÉRIAU HYGROSCOPIQUE**, sur la masse sèche du matériau. Ce contenu en eau dépend des conditions hygrométriques régnant dans l'environnement du matériau. Ces conditions sont caractérisées par l'indication de l'**HUMIDITÉ RELATIVE** et de la **TEMPÉRATURE** de l'environnement.



Exemple d'isothermes de sorption pour différents matériaux (DR).

À la place de « contenu en eau », certains auteurs parlent de *teneur en humidité*. Les deux expressions peuvent être considérées comme synonymes.

Dans certains secteurs industriels, on utilise la notion d'**ACTIVITÉ DE L'EAU** pour définir l'humidité relative d'**ÉQUILIBRE** d'un matériau hygroscopique.

La relation entre le contenu en eau d'un matériau hygroscopique et l'activité de l'eau (ou humidité d'équilibre de l'environnement) est représentée par une courbe établie expérimentalement appelée *isotherme de sorption*. Comme son nom l'indique, l'isotherme de sorption est valable pour une température donnée. En règle générale, quand la température augmente, toutes choses égales par ailleurs, le contenu en eau d'un matériau hygroscopique diminue. Et vice versa. De même, à température constante, lorsque l'humidité relative de l'environnement augmente, le contenu en eau du matériau augmente. La réciproque est vraie même si la courbe caractéristique de désorption peut s'écarter sensiblement de la courbe de sorption comme le montre l'exemple ci-contre. Ce phénomène d'**HYSTÉRÉSIS** s'explique par la cinétique des transferts d'eau dans la matrice solide.

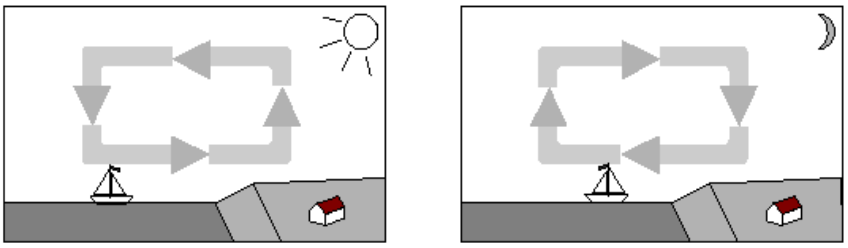
CONVECTION

Convection

Phénomène de transfert de **CHALEUR** et de **MASSE** dans un **FLUIDE**. Ce phénomène complexe résulte de l'action simultanée de deux

mécanismes principaux : la **CONDUCTION** dans le fluide qui répond à la *loi de Fourier*, et un transport de chaleur par la mise en mouvement du fluide appelé convection. Imaginons un petit **VOLUME** de fluide à une **TEMPÉRATURE** donnée mis au contact d'une surface dont la température est plus élevée. Par conduction, ce volume idéal s'échauffe. Sa densité va donc diminuer. Le fluide plus froid qui l'environne exercera par conséquent sur lui une poussée vers le haut (principe d'Archimède). Le volume fluide va se déplacer et céder la place à un volume identique à température plus basse qui, à son tour, s'échauffera. Et ainsi de suite. L'écart de température entre la surface chaude et le fluide induira de la sorte une mise en mouvement du fluide, caractéristique du transfert convectif. Le même raisonnement s'applique lorsque la surface est plus froide que le fluide. Le sens du transfert de chaleur est alors inversé et le fluide subit un mouvement dirigé vers le bas.

Lorsque le mouvement du fluide est dû au seul effet de son échauffement localisé, on parle de *convection naturelle*.



Brise de mer Brise de terre

Doc. B. Urgelli.

Les phénomènes de brise de mer et de brise de terre qui se manifestent sur le littoral sont le résultat des mécanismes de convection.

Si le fluide placé au voisinage de la surface solide est déjà animé d'une certaine vitesse (effet du vent ou présence d'un organe mécanique comme un ventilateur ou une pompe), on parle de *convection forcée*.

COULEUR

Color

Perception sensorielle de l'œil humain liée à une certaine *longueur d'onde* du rayonnement reçu. Si le **SPECTRE** visible s'étend de 380 nm à 780 nm, la sensibilité spectrale de l'œil est maximale au voisinage de 550 nm. Pour rendre compte de la sensation visuelle humaine, des **GRANDEURS** et des **UNITÉS** de mesure spécifiques ont été créées : elles sont dites photométriques (→ **Grandeurs et unités photométriques**, p. 106) par opposition aux grandeurs purement énergétiques.

« Quelle est la couleur de cet objet ? » D'un strict point de vue physique, il faut bien admettre que cette question n'a aucun sens. En soi, un objet n'a pas de couleur. Soumis à un **RAYONNEMENT**, il va partiellement le réfléchir, le transmettre ou l'absorber. Seule la fraction réfléchie est susceptible d'influencer notre perception visuelle. Tout dépend donc, en premier lieu, de la nature du rayonnement que reçoit l'objet, et, plus particulièrement, du spectre de ce rayonnement qui, la plupart du temps, n'est pas monochromatique (composé d'une seule

longueur d'onde). La **LUMIÈRE** du Soleil se caractérise par un large spectre allant de l'*ultraviolet* à l'*infrarouge*, autrement dit, par un rayonnement composé de très nombreuses longueurs d'onde. En frappant l'objet considéré, la plupart seront absorbées. De fait, la « couleur » que nous attribuons à l'objet n'est que la perception rétinienne des seules longueurs d'onde que l'objet a réfléchies ! Ainsi, un individu dont la vision est « normale » attribuera la couleur orange à une… orange si celle-ci est éclairée par une lumière semblable à celle émise par le Soleil. Si le spectre du rayonnement reçu par l'objet change, sa couleur changera. La couleur d'un objet n'est donc définie que pour un spectre donné du rayonnement incident.

Le *blanc* est la couleur attribuée à une surface capable de diffuser également dans toutes les directions l'intégralité du spectre radiatif qu'elle reçoit. Inversement, le *noir* est la couleur attribuée à une surface absorbant intégralement toutes les longueurs d'onde.

La *colorimétrie* est la branche de la métrologie qui vise à mesurer les caractéristiques physiques d'une couleur.

D

DEGRÉ HYGROMÉTRIQUE

Humidity percentage

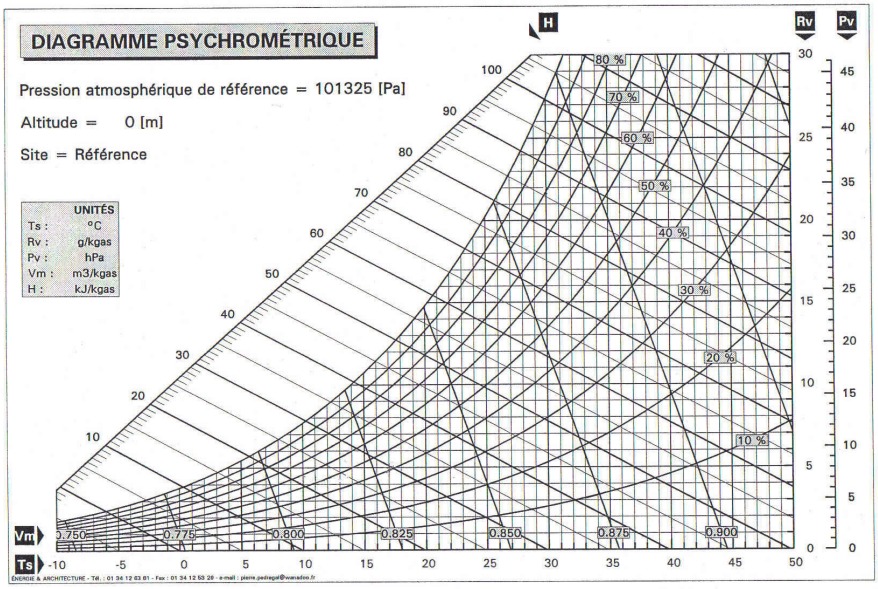
Rapport entre le **RAPPORT DE MÉLANGE** observé d'un certain volume d'**AIR HUMIDE** et le rapport de mélange qui caractériserait cet air humide porté à **SATURATION** à la même **TEMPÉRATURE** et à la même **PRESSION**. Comme l'**HUMIDITÉ RELATIVE**, le degré hygrométrique s'exprime en pourcentage. Présentant des valeurs proches, humidité relative et degré hygrométrique sont des notions souvent confondues. Il est parfois appelé *degré de saturation*.

Soit un air humide pris à l'altitude de 0 mètre, à la température de 20 °C et présentant une humidité relative de 50 %. Son degré hygrométrique est de 49,4 %, valeur peu différente, il faut bien l'admettre, de 50 %.

DIAGRAMME PSYCHROMÉTRIQUE

Psychrometric chart

Représentation graphique des relations **THERMODYNAMIQUES** entre toutes les propriétés physiques de l'**AIR HUMIDE**. Ces relations dépendent pour la plupart de la **PRESSION** totale du mélange **AIR SEC** et **VAPEUR** d'eau. C'est la raison pour laquelle on fait figurer sur chaque diagramme psychrométrique, la **PRESSION ATMOSPHÉRIQUE** (ou l'altitude, ce qui revient au même puisqu'à chaque altitude correspond une pression de référence) pour laquelle il a été tracé. Le diagramme psychrométrique est parfois appelé *diagramme de l'air humide* ou *abaque de Mollier*, d'après Richard MOLLIER (1863-1935), professeur de physique à l'université de Goettingen, qui a créé ce type de graphe.



L'entrée dans le graphe se fait avec deux **GRANDEURS** quelconques. Il suffit ensuite de lire toutes les autres grandeurs sur les échelles appropriées. Le diagramme psychrométrique est l'outil de travail de base pour toute personne qui doit appréhender les différents paramètres caractéristiques de l'air humide.

DIÉLECTRIQUE

Dielectric

Se dit d'un corps non conducteur dans lequel l'application d'un **CHAMP** électrique provoque un déplacement relatif des *électrons* vis-à-vis du noyau des **ATOMES** constituant le diélectrique. L'application de ce champ électrique va donc induire une polarisation électronique du diélectrique. Un **MATÉRIAU** diélectrique se caractérise par sa *permittivité relative*. C'est une **GRANDEUR** sans **DIMENSION** indiquant la décroissance de l'intensité du champ électrique après l'introduction du diélectrique dans ce champ. Par définition, la permittivité relative du vide est égale à 1. Par comparaison, celle de l'eau pure vaut 81. Pour la plupart des polymères, elle est comprise entre 2 et 5.

Des essais ont montré que les propriétés diélectriques particulières de l'eau pouvaient être mises à profit pour détruire des micro-organismes par effet thermique à l'aide d'un générateur de micro-ondes. De plus, l'échauffement sélectif par irradiation des molécules d'eau libre dans les matériaux permet l'évaporation de l'eau imprégnant un objet sans que l'on soit obligé de le chauffer, favorisant ainsi son assèchement.

Ces mêmes propriétés diélectriques de l'eau sont à la base de nouvelles techniques comme la réflectométrie dans le domaine temporel (nommée TDR d'après l'anglais *time domain reflectometry*) pour la détection des taux d'humidité dans les matériaux poreux.

DIFFUSION

Diffusion

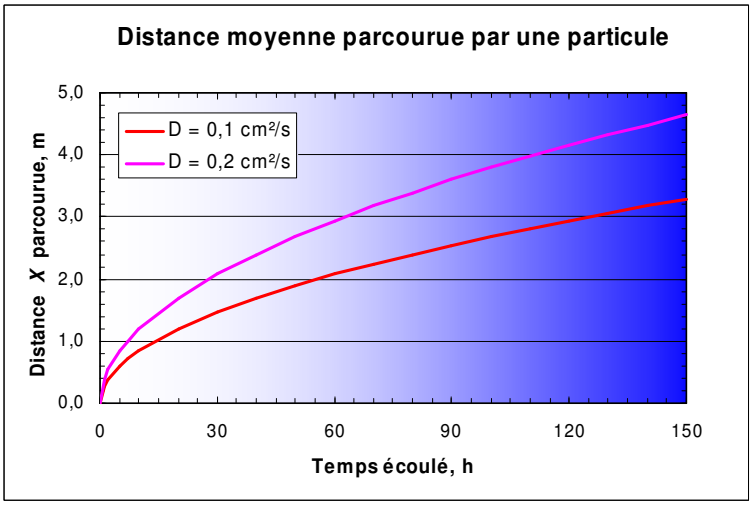
Phénomène de transport d'une substance dans une autre dont le moteur est le mouvement désordonné (**MOUVEMENT BROWNIEN**) des **MOLÉCULES**. Ce phénomène se manifeste dans les **SOLIDES**, les **LIQUIDES** et les **GAZ** où existe initialement un **GRADIENT** de concentration. La diffusion s'exerce à une échelle soit moléculaire, soit

particulaire (agrégat de molécules). Il est d'autant plus important que le mouvement relatif des molécules composant les substances en présence est grand. Par conséquent, le mécanisme de diffusion est plus rapide dans un gaz que dans un solide : la vitesse de diffusion est de l'ordre de $2 \cdot 10^{-3}$ m/s dans les gaz, $2 \cdot 10^{-5}$ m/s dans les liquides et seulement de $2 \cdot 10^{-9}$ m/s dans les solides.

Dans le cas de la diffusion d'un gaz dans un autre gaz, la distance moyenne $\bar{x}$ parcourue par une molécule en un **TEMPS** t est donnée par la relation :

$$\bar{x} = \sqrt{2 \cdot D \cdot t},$$

dans laquelle D est appelé *coefficient de diffusion*. Comme le montre l'expression précédente, le coefficient de diffusion a la dimension d'une surface par seconde. Les valeurs de D étant faibles, on utilise souvent le cm²/s comme unité. Ce coefficient augmente lorsque la température augmente. Dans le cas des gaz, le coefficient de diffusion est proportionnel à la vitesse moyenne des molécules constituant le gaz et à leur **LIBRE PARCOURS MOYEN**.



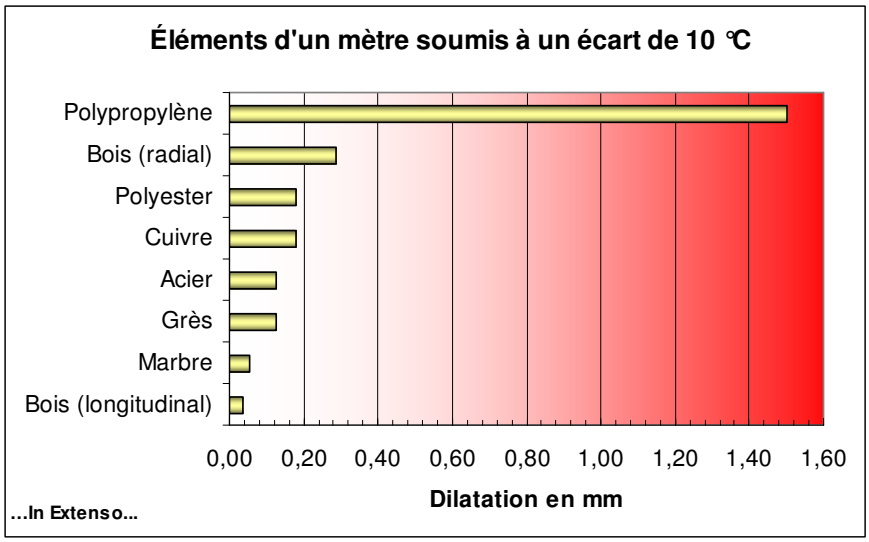
Le graphe précédent montre le temps nécessaire à une molécule de gaz pour parcourir une certaine distance à partir de sa source d'émission. Si cette molécule est du radon (D = 0,1 cm²/s), il lui faudra 125 heures pour se retrouver à 3 mètres de sa source. On le voit, le processus de diffusion est relativement lent, même dans les gaz. Cependant, dans une ambiance très calme, dans laquelle ne se manifeste aucun autre phénomène de **DISPERSION**, il suffit à expliquer le mélange constaté de gaz dont les **MASSES MOLAIRES** sont très différentes. En effet, contrairement à une croyance commune, les gaz ne se stratifient pas dans un local en fonction de leur masse molaire. Il n'est pas rare que des ouvrages « scientifiques » participent à la diffusion (!) de cette croyance inspirée du comportement des liquides. On peut montrer que la diffusion correspond à un processus irréversible accompagné d'une augmentation de l'**ENTROPIE**. La stratification des composants d'une masse gazeuse violerait donc le *second principe* de la **THERMODYNAMIQUE** Au terme d'un délai suffisamment long, le phénomène de diffusion gazeuse induit inexorablement un mélange parfait des substances gazeuses en présence. Cependant, s'il existe en

un point une source permanente d'une substance diffusant dans un milieu, un gradient permanent s'y établira. Le gradient observé peut être confondu, à tort, avec une stratification liée au poids moléculaire respectif de la substance diffusante et du milieu. Mais, comme nous l'avons dit, une stratification de ce type est, par nature, impossible dans un milieu gazeux.

DILATATION

Dilatation

Phénomène d'augmentation du **VOLUME** d'un corps sous l'effet d'un apport d'**ÉNERGIE**. Imaginons le comportement d'une seule **MOLÉCULE** composant une substance solide. Si on la chauffe, son énergie interne augmente et se traduit par un accroissement de l'amplitude de ses vibrations dans l'espace. Si cette molécule appartient à un réseau moléculaire, ses vibrations vont « éloigner » les molécules voisines. Si ces dernières s'échauffent à leur tour, elles vont elles aussi occuper une place un peu plus grande dans l'espace. De proche en proche, le corps tout entier va augmenter de volume. Il se sera dilaté.



Le graphe précédent donne un ordre de grandeur de la dilatation en fonction d'une élévation de **TEMPÉRATURE** de 10 °C pour quelques matériaux.

Selon la structure des corps, cette dilatation sera *isotropique* (égale dans toutes les directions de l'espace) ou *anisotropique* (une dimension est privilégiée). Un bon exemple de dilatation anisotropique est celui du bois dont la dilatation radiale est nettement supérieure à la dilatation longitudinale. (→ **SOLIDE**).

DIMENSION

Dimension

Représentation symbolique d'une **GRANDEUR** physique mesurable. Toute grandeur peut être rattachée aux sept **UNITÉS** fondamentales du **SYSTÈME INTERNATIONAL D'UNITÉS** (SI). Exprimer la dimension d'une grandeur physique permet d'expliciter sa relation avec les unités fondamentales. Cette opération est appelée *analyse dimensionnelle* ou *analyse aux dimensions*. Le tableau suivant donne les quatre plus courantes :

Grandeurs	Dimensions	Unités SI
Longueur	**L**	mètre (m)
Masse	**M**	kilogramme (kg)
Temps	**T**	seconde (s)
Température absolue	**Θ**	kelvin (K)

Prenons un premier exemple très simple : le **VOLUME** est le produit de trois **LONGUEURS**. Dans le formalisme de l'analyse dimensionnelle, on écrira qu'un volume a pour dimension $\mathbf{L^3}$. La traduction de cette dimension dans le système SI est directe : il suffit de remplacer le symbole de la dimension « **L** » par celui de l'unité « m ». Un volume s'exprimera donc en m^3. Autre exemple : la vitesse est le rapport d'une longueur et d'un **TEMPS**. L'analyse dimensionnelle conduit donc à l'expression de la vitesse en $\mathbf{LT^{-1}}$. Traduit en unité du système SI, il vient immédiatement m/s.

Certaines grandeurs sont exprimées dans des unités auxquelles on a donné un nom particulier : il s'agit le plus souvent d'un hommage à un scientifique. C'est le cas de l'**ÉNERGIE**, par exemple, pour laquelle on utilise le joule (J). Pour commode qu'il soit, ce nom masque la « généalogie » de cette grandeur. L'analyse dimensionnelle de l'énergie nous conduit à dire que l'énergie est le produit d'une **FORCE** et d'une longueur. Comme une force résulte du produit d'une **MASSE** par une accélération, il s'en suit qu'une énergie est le produit d'une masse et d'une surface divisé deux fois par le temps, soit, dans la notation symbolique : $\mathbf{ML^2T^{-2}}$. L'analyse dimensionnelle permet de vérifier très rapidement que la pression (ratio d'une force et d'une surface, $\mathbf{MLT^{-2}/L^2 = ML^{-1}T^{-2}}$) est équivalente à une énergie volumique ($\mathbf{ML^2T^{-2}/L^3 = ML^{-1}T^{-2}}$) ce que ne laisse pas soupçonner l'examen des seules unités (respectivement Pa et J/m^3).

L'importance de l'analyse dimensionnelle vient de la facilité avec laquelle elle permet de vérifier l'homogénéité d'une relation entre plusieurs grandeurs physiques. Elle facilite également considérablement la conversion de données entre différents systèmes d'unités, la notation symbolique des dimensions servant de référence commune.

Une grandeur sans dimension (l'**HUMIDITÉ RELATIVE** par exemple) est telle que la valeur numérique qui la représente est indépendante du système d'unités choisi.

DISPERSION

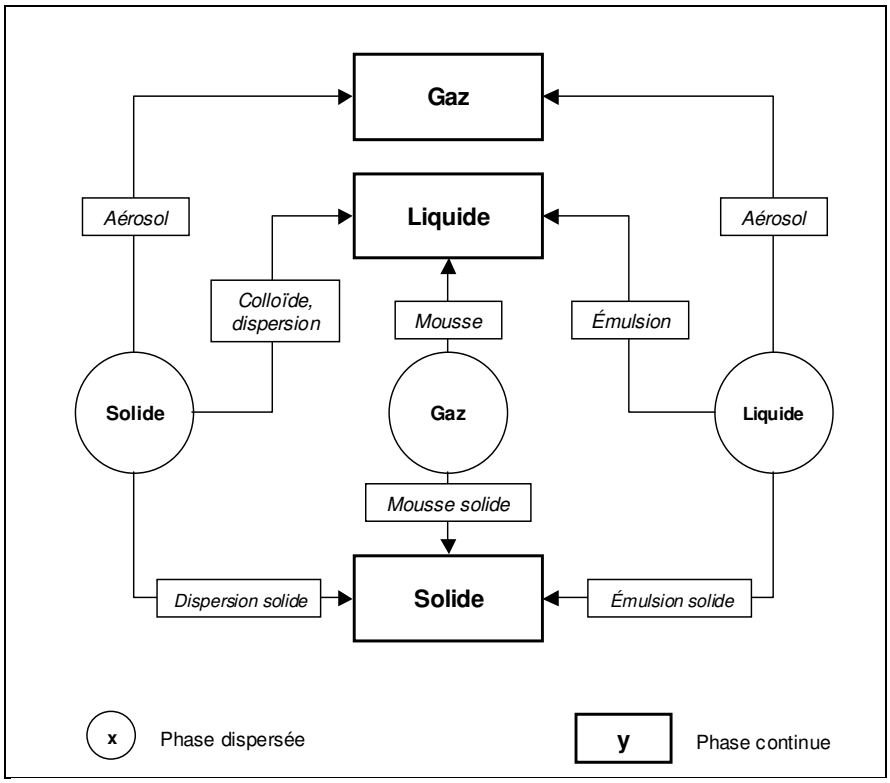
Dispersion

SYSTÈME physico-chimique composé d'une *phase dispersée* solide, liquide ou gazeuse, et d'une *phase continue* solide, liquide ou gazeuse. Cette appellation de dispersion est réservée aux substances non-miscibles. Aussi ne parle-t-on pas de dispersion gaz → gaz car tous les **GAZ** sont totalement miscibles. On parlera dans ce cas de *mélange gazeux*. La notion de dispersion liquide → liquide n'a de sens que dans le cas de liquides non-miscibles. Si les liquides sont miscibles, on parlera de **SOLUTION**. Selon la nature des phases dispersées et continues, les dispersions portent des noms différents comme

l'indique le tableau ci-après :

Phase dispersée →	Phase continue	Nom	Exemples
Liquide →	Gaz	Aérosol	Brouillard, nuage
Solide →	Gaz	Aérosol	Fumée
Gaz →	Liquide	Mousse	Mousse à raser
Liquide →	Liquide	Émulsion	Lait, vinaigrette
Solide →	Liquide	Colloïde	Peinture, encre
Gaz →	Solide	Mousse solide	Verre cellulaire
Liquide →	Solide	Émulsion solide	Crème glacée
Solide →	Solide	Dispersion solide	Rubis

Le graphe suivant est une illustration du tableau précédent.



Graphe des milieux dispersés

DYNAMIQUE

Unsteady state

Qualifie un **RÉGIME** variable en fonction du **TEMPS**, imposé à un **SYSTÈME** physique. S'oppose à **STATIQUE**. Dans la famille des régimes dynamiques, on distingue les régimes **TRANSITOIRES**, **PÉRIODIQUES** et **VARIÉS**. Dans la nature, rares sont les systèmes physiques qui ne sont pas dynamiques.

E

EAU

Water

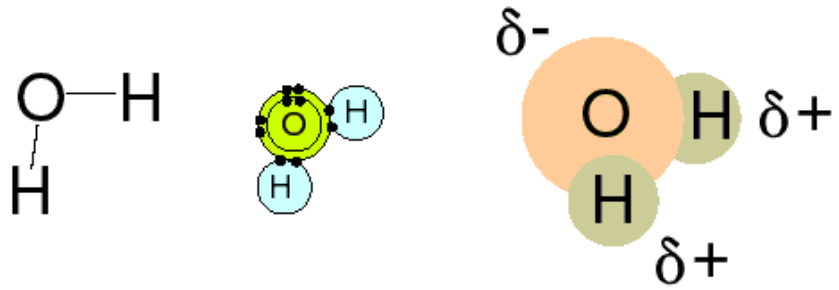
Corps pur de formule chimique H_2O. L'eau – que l'on pourrait nommer « monoxyde d'hydrogène » – présente de nombreuses singularités liées à la nature polaire de ses **MOLÉCULES** : grande

capacité à dissoudre les substances, forte **TENSION SUPERFICIELLE**, **CHALEUR** de vaporisation élevée, etc. La polarité de la molécule d'eau est due à son asymétrie. Les deux *liaisons covalentes* O–H, dont la longueur est un peu inférieure à un ångström (10^{-10} m), forment entre elles un angle de 104,5°. Il en résulte une répartition non uniforme du nuage électronique autour de la molécule qui, bien que globalement neutre, présente un *moment dipolaire* permanent (μ = 1,85 debye) induit par la non superposition des barycentres des charges positives et négatives. L'eau n'est pas la seule substance polaire. Autre solvant, l'acétone l'est bien davantage (μ = 2,88 debye). Le debye est une unité *ad hoc*. Nous avons la correspondance suivante avec le système SI :

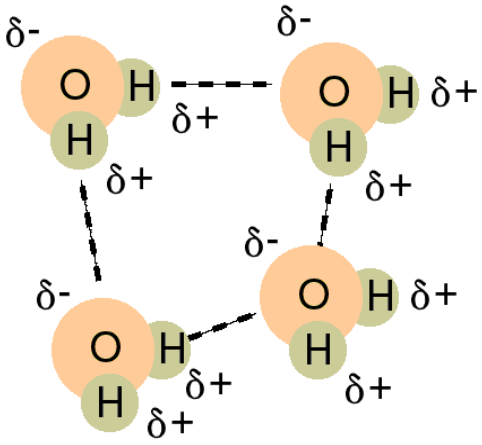
$$1 \text{ debye} = 3{,}33564 \cdot 10^{-30} \text{ coulomb·mètre.}$$

Autre curiosité, l'eau est l'une des très rares substances qui augmente de **VOLUME** en passant à l'état solide. Cette augmentation est de l'ordre de 8 %. Elle est due à l'organisation cristalline particulière de la glace selon un schéma tridimensionnel où chaque **ATOME** d'oxygène est lié à deux atomes d'hydrogène par des liaisons covalentes mais aussi à deux autres atomes d'oxygène par des **LIAISONS HYDROGÈNE**.

À l'état gazeux, on lui donne souvent le nom de **VAPEUR** d'eau. En mélange avec l'**AIR** sec présent dans l'atmosphère, elle forme de l'**AIR HUMIDE** dont les propriétés **THERMODYNAMIQUES** sont déterminées grâce au **DIAGRAMME PSYCHROMÉTRIQUE**.



Différentes représentations graphiques de l'eau. La figure de droite met en évidence la polarité de la molécule. DR



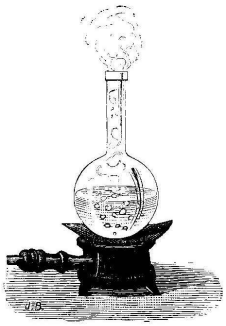
La polarité des molécules d'eau permet la constitution de liaisons « hydrogène » (représentées par des traits pointillés) qui jouent un rôle important dans le comportement de l'eau.

DR

ÉBULLITION

Boiling

Phénomène de **VAPORISATION** rapide d'un **LIQUIDE** recevant un important **FLUX** énergétique. Ce phénomène s'accompagne de la formation au sein du liquide de bulles de **VAPEUR** qui viennent éclater



Le panache qui s'échappe du col du ballon chauffé où se produit l'ébullition du liquide est un mélange de vapeur d'eau (invisible) et de fines gouttelettes d'eau (visibles) provenant de la recondensation immédiate d'une partie de la vapeur d'eau dans l'air environnant (Doc. DRION & FERNET).

à la surface du liquide. Pour un liquide donné, cette ébullition ne peut se produire qu'à une **TEMPÉRATURE** donnée qui dépend de la pression environnante. Pour de l'eau et pour une **PRESSION ATMOSPHÉRIQUE** égale à 101 325 Pa, cette ébullition se produit à 100 °C. Au sommet de l'Everest, à 8 847 m d'altitude, la pression atmosphérique n'est plus que le tiers de celle qui règne au niveau de la mer. L'eau bout à 70 °C. Si l'on diminue encore la pression jusqu'à la valeur de 612 Pa, l'ébullition se produit à 0,01 °C. De fait, il s'agit d'une limite dite *point triple* de l'eau qui voit coexister les trois phases solide, liquide et gazeuse en **ÉQUILIBRE** (→ **CHANGEMENT D'ÉTATS**). Si l'on diminue encore la pression, l'eau ne peut plus exister à l'état liquide. Ce point triple est si parfaitement défini qu'il sert d'étalon de température.

Si, à l'inverse, on augmente la pression au delà de la pression atmosphérique standard dans un récipient contenant de l'eau liquide, l'ébullition se produira au dessus de 100 °C. Ainsi, pour une pression égale à deux fois la pression atmosphérique, l'ébullition ne se produit qu'à 120 °C.

ÉLECTROLYTE

Electrolyte

Substance liquide ou solide dans laquelle le phénomène de conduction électrique peut se manifester. Cette conduction est due à la mobilité des **IONS** (*cations* et *anions*) présents dans l'électrolyte. Aussi, parle-t-on de *conduction ionique* dans les électrolytes par opposition à la *conduction électronique* due aux déplacements des *électrons*. La conductivité électrique d'un électrolyte s'exprime en siemens par mètre (S/m). On rappelle que le siemens est l'inverse de l'ohm (unité de résistance électrique, notée Ω). On peut également caractériser un électrolyte par sa résistivité. Elle s'exprime alors en Ωm.

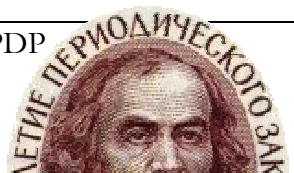
On doit à Svante ARRHENIUS d'avoir, le premier, compris le mécanisme de la *dissociation électrolytique* dite aussi *dissociation ionique*, qui se produit spontanément dans une solution. Ce résultat remarquable surprit tout d'abord la communauté des chimistes avant qu'ils ne finissent par se rendre à l'évidence : nul besoin d'un courant électrique pour que la dissociation ionique se produise. Ce sujet fut le thème de la conférence qu'il prononça lorsqu'il reçut le prix Nobel en 1903.

Bien que constituée de **MOLÉCULES** polaires, l'**EAU** pure est un mauvais électrolyte. En revanche, sa conductivité électrique peut augmenter considérablement en y dissolvant des sels. Ainsi, l'eau pure a une conductivité voisine de $8{,}3 \cdot 10^{-5}$ S/m contre 5 S/m pour l'eau de mer (saturée avec du chlorure de sodium NaCl). L'eau de mer est donc 60 000 fois plus conductrice que l'eau pure !

ÉLÉMENT

Element

Substance qui ne peut plus être décomposée en une substance plus élémentaire. 92 éléments naturels ont été découverts dans l'Univers. L'**ATOME** de chaque élément est constitué d'un noyau formé de *protons* et de *neutrons* (à l'exception de l'élément hydrogène) autour duquel gravitent des *électrons*. Un atome étant toujours électriquement neutre, il y a toujours autant d'électrons que de protons. L'élément le plus lourd



est l'uranium dont le noyau comporte pas moins de 92 protons et 146 neutrons ! Mais les physiciens ont su faire mieux en créant des éléments artificiels appelés *transuraniens*. On en compte désormais une bonne vingtaine.

Il revient à Dmitri Ivanovitch MENDELEÏEV d'avoir proposé le premier un classement rationnel des éléments en fonction de leurs propriétés dans lesquelles une certaine périodicité se manifestait. Il établit une table qui porte son nom mais qui est aussi dénommée *tableau périodique des éléments*.

Un excellent tableau est proposée au téléchargement sur le site spécialisé du ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche : http://www.science.gouv.fr/index.php?qcms=decouverte,view,2420,,158,7,,,,

ÉMULSION

Emulsion

DISPERSION dans lequel la **PHASE** dispersée et la **PHASE** continue sont toutes deux des **LIQUIDES** (→ **COLLOÏDE**). En général, un agent spécifique (*émulsifiant*) est nécessaire pour stabiliser l'émulsion.

ÉNERGIE

J

Energy

GRANDEUR caractéristique de l'état d'un corps (état de mouvement, **TEMPÉRATURE**, déformation, charge électrique, etc.). Elle se manifeste sous diverses formes : calorifique, chimique, électro-magnétique, électrique, mécanique, etc. L'énergie peut se transformer d'une forme en une autre mais ne peut être ni produite ni détruite. Cette affirmation peut être qualifiée de « *principe* », au sens d'une proposition fondatrice de la **THERMODYNAMIQUE**. Notons qu'à ce jour, elle n'a jamais été démontrée mais aussi qu'aucune expérience ne l'a jamais invalidée. Dans ce principe de conservation de l'énergie, s'entend comme un écho du principe de conservation de la **MASSE** et des éléments chimiques énoncé au XVIII^e^ siècle par le savant français Antoine Laurent de LAVOISIER (1743-1794).

La Nature impose, cependant, des limites à certaines transformations : ainsi, si le travail (énergie mécanique) peut être intégralement transformé en chaleur, l'inverse n'est pas vrai. Cette limitation est due au deuxième principe de la **THERMODYNAMIQUE**.

Toutefois, l'énergie totale d'un **SYSTÈME** est toujours conservée. L'énergie interne d'un corps peut être augmentée ou diminuée par le **TRAVAIL** qu'il délivre ou qu'il reçoit. Ce travail modifie alors son état (position, vitesse, accélération, température, déformation, charge électrique, etc.). L'énergie est donc également une mesure du travail modifiant l'état d'un corps.

Le mot énergie vient du grec *ενεργια* qui peut se traduire par « force en action ». C'est précisément ce que reflète l'*analyse dimensionnelle* de cette grandeur. L'énergie a en effet pour **DIMENSION** le produit d'une **FORCE** par une **LONGUEUR**. C'est donc bien une force qui se déplace ! L'unité d'énergie a été baptisée du nom de James Prescott JOULE (1818-1889), l'immense savant anglais dont les recherches sur l'électricité et la calorimétrie demeurent encore aujourd'hui incontournables.

ÉNERGIE CINÉTIQUE

J

Kinetic energy

Mesure du **TRAVAIL** que peut fournir un **SYSTÈME** de par son mouvement. Elle est proportionnelle à la **MASSE** *m* du système et au carré de sa vitesse *v* selon la simple et belle expression :

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2.$$

Si le système est initialement au repos, il faut donc lui fournir une énergie égale à E_c pour l'amener à la vitesse *v*. Inversement, s'il est à la vitesse *v*, l'amener au repos restituera une énergie égale à E_c.

ÉNERGIE D'ACTIVATION

[J/mol]

Activation energy

Quantité d'**ÉNERGIE** qu'on doit fournir à des substances pour enclencher une **RÉACTION** chimique entre elles. Une feuille de papier ne brûle pas spontanément à la **TEMPÉRATURE** ambiante. En revanche, si on lui fournit une énergie d'activation suffisante, grâce à la flamme d'une allumette par exemple, la réaction de combustion se produira. Comme cette réaction est *exothermique*, elle fournira au reste de la feuille de papier l'énergie d'activation nécessaire à la propagation de la combustion. Pour une réaction donnée, l'énergie d'activation permet que les liaisons chimiques des *réactifs* soient tout d'abord rompues avant que d'autres ne soient nouées pour la formation des *produits*.

Par ailleurs, on peut systématiquement vérifier que la vitesse des réactions chimiques augmente lorsque la température s'accroît.

Svante ARRHENIUS (1859-1927), prix Nobel de Chimie en 1903, a su synthétiser ces observations et proposer une *loi* qui désormais porte son nom. Elle permet de déterminer un taux d'accroissement relatif de la cinétique d'une réaction chimique en fonction de l'énergie d'activation requise par les substances en présence, et de la température à laquelle se produit la réaction. L'application de cette loi d'allure exponentielle montre qu'en moyenne, un accroissement de 10 °C de la température double la *cinétique réactionnelle*. À l'inverse, une diminution de 10 °C la divise par deux. On voit toutes les conséquences qu'on peut tirer de ces faits pour la conservation des collections.

ÉNERGIE POTENTIELLE

J

Potential energy

Mesure de l'**ÉNERGIE** stockée dans un **SYSTÈME** en fonction de sa position, de sa forme et/ou de son **ÉTAT**. Cette définition large inclut l'*énergie gravitationnelle*, l'*énergie électrique*, l'*énergie chimique* et l'*énergie nucléaire*. Les oscillations d'un ressort constituent un bonne illustration d'une transformation de l'énergie mécanique qui passe continument d'une forme cinétique à une forme potentielle.

ENTHALPIE MASSIQUE

J/kg$_{as}$

Mass enthalpy

GRANDEUR caractérisant l'**ÉNERGIE** interne d'une **MASSE** d'**AIR HUMIDE**. Par convention, sur un **DIAGRAMME PSYCHROMÉTRIQUE**, l'enthalpie massique d'une masse d'air sec dont la température est de 0 °C est fixée à 0 J/kg$_{as}$. Pour faciliter les calculs, la valeur de

l'enthalpie est exprimée par rapport à la masse d'air sec contenue dans le volume d'air humide considéré. C'est la raison pour laquelle l'indice « as » – comme air sec – est ajouté à l'unité « kg ».

ENTROPIE

J/K

Entropy

GRANDEUR EXTENSIVE mesurant le degré de désordre microscopique d'un **SYSTÈME** (symbole *S*). Cette définition peut paraître abstraite sinon absconse, voire abstruse ! L'importance de cette notion justifie cependant tous les efforts qui doivent être consentis pour tenter d'en pénétrer le sens profond.

L'état macroscopique le plus probable d'un système est celui qui correspond au maximum de configurations microscopiques possibles. Prenons un exemple. Soit un récipient empli d'un gaz. À un instant donné, une **MOLÉCULE** de gaz se trouve soit dans la moitié gauche du récipient, soit dans la moitié droite. Est-il possible d'imaginer que toutes les molécules puissent se trouver du même côté, au même moment ? Théoriquement, cette situation est possible. Mais elle est d'autant plus improbable que le nombre de molécules de gaz dans le récipient est élevé. Dans le système considéré, l'ordre est maximum lorsque toutes les molécules sont groupées dans la moitié droite. L'entropie est alors minimale. Mais l'état le plus probable n'est pas celui-là. Il correspond plutôt à la situation où toutes les molécules sont équiréparties dans le volume total du récipient. Le « désordre » est alors maximal ainsi que l'entropie.

Le grand physicien autrichien Ludwig BOLTZMANN (1844-1906) a découvert en 1877 la loi qui porte son nom et qui permet de relier l'entropie S au nombre d'états microscopiques Ω que peut adopter un système physique. Elle s'écrit très simplement :

$$S = k_B \cdot \ln \Omega,$$

dans laquelle « ln » est le symbole des logarithmes népériens et k_B est la *constante de Boltzmann* ($k_B = 1{,}38065 \cdot 10^{-23}$ J/K). C'est cette même constante qui intervient dans le calcul de R, la constante des **GAZ PARFAITS**. Comme la *loi de Boltzmann* permet de le vérifier, plus il y a de molécules, plus le nombre de configurations microscopiques qu'elles peuvent adopter est grand et donc plus l'entropie s'élève.

La notion d'entropie est au cœur du deuxième et du troisième principes de la **THERMODYNAMIQUE**.

[Découragé par les hommes de son époque, Ludwig Boltzmann s'est donné la mort en 1906, à l'heure où ses découvertes commençaient à bouleverser la physique. La belle et féconde formule qu'il a proposée est aujourd'hui gravée sur sa tombe au cimetière central de Vienne.]

ÉQUATION

Equation

Relation mathématique attribuant une valeur à une variable par le biais d'une égalité comme l'indique l'étymologie (du latin *æquatio* « égalité »). La valeur attribuée à la variable peut être une **GRANDEUR** numérique (*scalaire* ou *vectorielle*) ou bien une combinaison d'autres variables. Ces dernières seront alors qualifiée de variables indépendantes tandis que la première sera dite dépendante (sous entendu des autres variables). En physique, une équation représente une propriété d'un **SYSTÈME** ou une **FONCTION** entre plusieurs grandeurs caractéristiques du système

(→**ÉQUATION D'ÉTAT**). Les équations de la physique permettent notamment de décrire l'évolution dans l'**ESPACE** et le **TEMPS** des grandeurs permettant de décrire le système considéré.

ÉQUATION D'ÉTAT
Equation of state

Relation **THERMODYNAMIQUE** reliant diverses **GRANDEURS** caractéristiques de l'**ÉTAT** du corps (comme précisément la **PRESSION**, le **VOLUME** et la **TEMPÉRATURE**). L'*équation des gaz parfaits* est typiquement une équation d'état. Les variables intervenant dans une équation d'état sont dites *variables d'état*. Ce sont des grandeurs soient *intensives*, soit *extensives*.

ÉQUILIBRE
Equilibrium

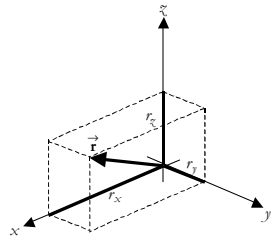
État d'un **SYSTÈME** dont les **GRANDEURS** caractéristiques ne varient plus au cours du **TEMPS**. Il n'existe probablement aucun système physique en état d'équilibre absolu. Il faudrait pour cela qu'il soit parfaitement isolé ce qui ne semble pas possible. En revanche, il est possible de dire que tel système ou tel processus d'échange entre systèmes tend vers l'équilibre et d'en prédire les caractéristiques. Prenons un exemple. Si l'on place une casserole pleine d'eau sur une plaque chauffante, on atteint un point d'équilibre pour l'eau lorsque la température d'**ÉBULLITION** est atteinte. En effet, la température de l'eau demeure constante même lorsque de l'énergie continue d'être fournie à la casserole. Cette **ÉNERGIE** va être utilisée pour la production de **VAPEUR D'EAU** à partir de l'eau liquide, mais aussi pour maintenir la température de la casserole qui cède de la **CHALEUR** à l'environnement par **CONVECTION** et **RAYONNEMENT**.

La plupart du temps, la notion d'équilibre ne sera pas utilisée dans son sens strict. Elle sera au contraire employée pour désigner un état aussi proche de l'équilibre qu'il est possible de l'imaginer ou de le mesurer.

ESPACE
Space

Au sens strict, entité mathématique permettant de déterminer la position d'un point ou, plus généralement, d'un **SYSTÈME** matériel. Un espace peut ne comporter qu'une seule **DIMENSION**. Il se réduit alors à une simple droite (→ **LONGUEUR**). Doté de deux dimensions, il devient un plan. Avec trois dimensions, il constitue un **VOLUME**.

Tous les phénomènes physiques observables à l'échelle macroscopique se déroulent dans un espace à trois dimensions auquel s'ajoute la quatrième dimension du **TEMPS**. On parle alors d'*espace-temps*. L'étude d'un système **DYNAMIQUE** ne peut se faire qu'à l'intérieur d'un espace-temps.



Représentation d'un point dans un système de coordonnées cartésiennes.

Pratiquement, il faut procéder au choix d'un *système de coordonnées* afin de faciliter le repérage des entités constitutives du système étudié. Quatre valeurs numériques suffisent pour repérer un point dans l'espace-temps. Il existe de nombreux systèmes de coordonnées : coordonnées cartésiennes, polaires, cylindriques, sphériques, etc. Le choix est effectué en fonction de la facilité qu'offrent les coordonnées pour représenter le système étudié. Ainsi, pour étudier le déplacement d'un véhicule sur de petites distances, un système de coordonnées cartésiennes fera parfaitement l'affaire. En revanche, l'étude du

mouvement des astres sera plus facilement réalisée dans un système de coordonnées sphériques.

ÉTAT

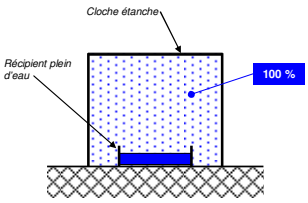
State

Organisation de la **MATIÈRE** en fonction de la **TEMPÉRATURE** et de la **PRESSION**. On dit aussi **PHASE**. Les corps purs présentent trois états principaux : l'état de **SOLIDE**, de **LIQUIDE** ou de **GAZ** (→ **CHANGEMENT D'ÉTAT**). Aux très hautes températures, l'agitation thermique est telle qu'il ne subsiste plus dans le **SYSTÈME** considéré qu'un ensemble d'**ATOMES** dépouillés de tout ou partie de leur cortège d'*électrons*. La matière se présente alors comme un gaz de particules ionisées : le *plasma*. 99 % de la matière existant dans l'univers est à l'état de plasma ! Le plasma peut être utile pour la conservation des objets patrimoniaux : des tests approfondis de déchloruration d'objets ferreux par plasma d'hydrogène ont été réalisés par le Laboratoire d'archéologie des métaux de Jarville.

À un instant donné, l'état d'un corps peut être caractérisé par une équation dite **ÉQUATION D'ÉTAT**. L'organisation de la matière dans certains corps peut prendre des formes beaucoup plus complexes appelées états *mésomorphes* réunissant certaines propriétés des solides et des liquides, comme par exemple dans le cas des cristaux liquides.

ÉVAPORATION

Evaporation



Phénomène de **VAPORISATION** lente au dessus d'une surface liquide ou humide. Deux milieux hygroscopiques dont les états hydriques respectifs diffèrent échangent de la **VAPEUR D'EAU** jusqu'à ce qu'un **ÉQUILIBRE** s'établisse entre eux. Ainsi, dans une enceinte close qui peut être, au départ, vide de tout gaz et dont la **TEMPÉRATURE** est fixe, un récipient ouvert contenant par exemple de l'eau, va fournir de la vapeur à l'ambiance jusqu'à ce que la **PRESSION PARTIELLE** de vapeur au dessus du liquide soit égale à la **PRESSION DE VAPEUR SATURANTE** correspondant à la température de l'ambiance. Si l'on mesure l'humidité relative dans une telle enceinte close, on obtiendra une valeur de 100 % confirmant la saturation. Si la température augmente et s'il subsiste suffisamment d'eau dans le récipient, le processus d'évaporation se poursuivra jusqu'à, de nouveau, obtenir la saturation de l'ambiance.

F

FILTRATION

Filtration

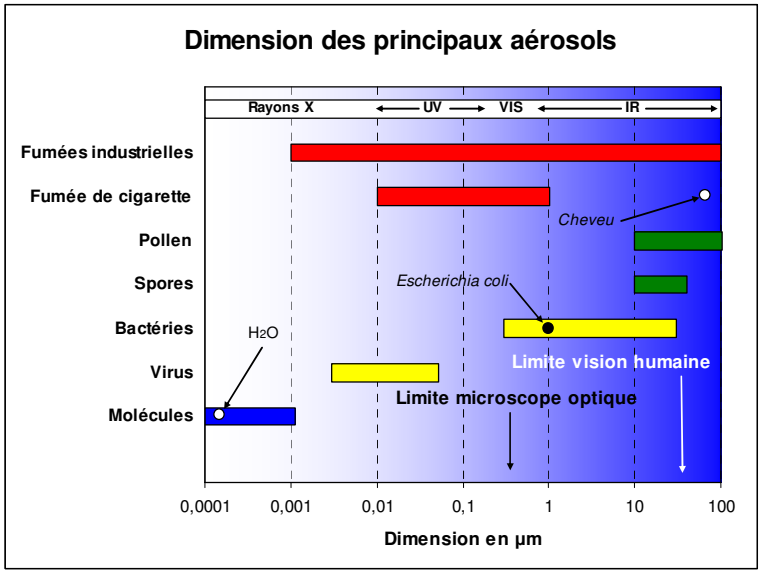
Action de filtrer. Filtrer consiste à épurer un **FLUIDE** en le débarrassant soit de particules en suspension (*filtration physique*), soit, dans le cas de la filtration des gaz, de molécules considérées comme des polluants (*filtration chimique*).

Les effets nocifs des polluants physiques, chimiques et biologiques de l'air sur les collections étant avérés, une stratégie de prévention doit impérativement prendre en compte la question de la filtration.

Le graphique suivant donne l'ordre de grandeur des dimensions de

quelques particules qu'il est possible de rencontrer dans l'air (→ **AÉROSOL**). Sur ce même graphe, nous avons reporté une échelle simplifiée du **SPECTRE** du **RAYONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE**. Nous avons également indiqué les limites de la vision humaine (pouvoir séparateur voisin de 40 µm) ainsi que les limites de la microscopie optique (aux environs de 0,4 µm). Afin de donner à ce graphique une échelle plus visuelle, sont figurés symboliquement une molécule d'eau (environ 0,0003 µm), une bactérie *Escherichia coli* (environ 1 µm), et un cheveu (diamètre d'environ 70 µm).

Filtrer physiquement l'air va consister à interposer sur le circuit imposé à l'air un média capable d'intercepter les particules qu'il transporte. L'efficacité de la filtration va dépendre des caractéristiques physiques du filtre en regard de la taille des particules à retenir mais aussi de son degré d'encrassement. Celui-ci peut être estimé à partir de la perte de pression (dite *perte de charge*) qu'il induit dans un circuit d'air. Lorsqu'il est propre, cette perte de charge est voisine d'une centaine de pascals. Elle s'accroît au fur et à mesure que le filtre se colmate. Paradoxalement, plus le filtre s'encrasse et plus il est efficace. C'est la raison pour laquelle, l'efficacité d'un filtre particulaire est toujours donnée pour une perte de charge limite.



Au regard des normes EN 779:2002 et EN 1822, les filtres particulaires sont classés en quatre grandes familles :

- *Filtres grossiers* : quatre classes (G1 à G4) en fonction de leur efficacité de rétention d'une poussière synthétique pour une perte de charge finale de 250 Pa.
- *Filtres fins* : cinq classes (F5 à F9) en fonction de leur efficacité de rétention de particules de diamètre 0,4 µm pour une perte de charge finale de 450 Pa. Un filtre F9 retient 95 % des particules de 0,4 µm lorsque la perte de charge atteint 450 Pa.
- *Filtres HEPA (High Efficiency Particulate Air)* : cinq classes (H10 à H14) en fonction de leur efficacité de rétention des particules les plus difficiles à stopper dont la dimension, nommée MPPS (*Most*

Penetrating Particule Size), est comprise, selon les filtres et les vitesses d'air, entre 0,1 et 0,2 µm.

- *Filtres ULPA (Ultra Low Penetration Air)* : trois classes (U15 à U17). Le critère de classement est le même que celui utilisé pour les filtres HEPA. Un filtre U17 présente une efficacité minimale de 99,999995 %. Ceci correspond à un coefficient d'épuration 1000 fois plus grand que celui d'un filtre HEPA H14 ! Ces filtres aux performances exceptionnelles sont réservés aux applications très exigeantes : fabrication de produits stériles ou de micro-processeurs, laboratoire de recherche sur les bio-contaminations, etc.

Certes, les performances des filtres particulaires augmentent avec le degré de colmatage, mais le coût d'exploitation s'accroît également dans les mêmes proportions. Ainsi, un filtre F9 filtrant un débit d'air d'un mètre cube par seconde à sa perte de charge nominale (450 Pa), impose une puissance supplémentaire de 750 W au ventilateur qui pulse l'air dans les conduits. Un filtre qui fonctionnerait toute l'année à sa perte de charge nominale serait responsable à lui seul d'une consommation électrique de 6 570 kWh, soit une dépense de 400 à 700 € (selon les tarifs applicables de l'électricité). Il est donc nécessaire de choisir avec beaucoup de soin le niveau de filtration à retenir en fonction des performances à obtenir et d'un coût d'exploitation acceptable.

La filtration particulaire n'est pas toujours suffisante. Si l'environnement de l'établissement qui abrite la collection à protéger est fortement pollué (c'est presque toujours le cas en zone urbaine), une filtration chimique doit être envisagée.

Contrairement au cas de la filtration physique, l'efficacité de la filtration chimique a plutôt tendance à diminuer avec le degré de « colmatage ». Elle est réalisée par l'interposition d'un filtre contenant une substance capable de retenir les polluants gazeux par **ADSORPTION** (*physisorption* ou *chimisorption)*. La plupart des filtres chimiques contiennent du *charbon actif* qui agit par physisorption. Ils peuvent aussi faire appel aux **ZÉOLITHES**. Le charbon actif s'obtient par carbonisation de matières végétales telle que notamment la noix de coco. Un traitement complémentaire appelé activation est réalisé à l'aide de vapeur d'eau à haute température. Il confère au matériau une très grande **POROSITÉ** conduisant à une *surface spécifique* supérieure à 1000 m^2/g. L'adsorption du charbon actif est surtout efficace sur les polluants de **MASSE MOLAIRE** supérieure à 30 g/mol et dont le point d'ébullition est supérieur à 60 °C à la pression atmosphérique. Il est possible d'imprégner le charbon actif avec des substances (iodure de potassium, hydroxyde de sodium, etc.) qui agissent par chimisorption pour conférer au médium filtrant une plus grande efficacité.

La capacité d'adsorption d'un filtre chimique s'exprime en pourcentage de la masse du charbon sec utilisé. Ainsi la plupart des odeurs qui sont dues à des molécules organiques, sont adsorbées à des taux compris entre 20 et 40 %. Ce qui signifie qu'un kilogramme de charbon actif est en mesure d'adsorber entre 200 et 400 g des

molécules responsables de l'odeur. Pour éviter son colmatage rapide, un filtre chimique doit être protégé en amont par une unité de filtration particulaire très efficace.

FLUIDE
Fluid

Terme générique désignant les **LIQUIDES** et les **GAZ**. Dans un fluide, les forces de **COHÉSION** sont moindres que dans un **SOLIDE**. Le fluide peut donc adopter la forme du récipient qui le contient.

FLUX
Flux

Terme générique désignant un écoulement. Selon le domaine auquel le terme se rapporte, il peut prendre un sens plus précis. Ainsi, un *flux thermique* représente un transfert de chaleur dans l'unité de temps. Il a donc la dimension d'une puissance et s'exprimera donc en joule par seconde. Le joule par seconde a été baptisé d'un nom particulier le watt (W). Si l'on veut de plus rapporter un flux à l'unité de surface pour exprimer un transfert thermique au travers d'une paroi par exemple, on utilisera l'expression de *densité de flux*. L'unité utilisée sera alors le watt par mètre carré (W/m^2).

La notion de flux existe également en photométrie (→ **Grandeurs et unités photométriques**). L'unité de *flux lumineux* est le lumen (lm). La notion de densité de flux existe également dans ce domaine. On utilise plutôt l'expression d'*éclairement lumineux*. L'unité d'éclairement lumineux est le lux ($1\ lx = 1\ lm/m^2$).

On trouve également cette notion de flux en électricité : le *flux électrique* dont l'unité est le coulomb (C) et le *flux magnétique* dont l'unité est le weber (Wb).

FONCTION
Function

Structure mathématique établissant une relation entre plusieurs entités communément appelées *variables*. Les mathématiciens sont en mesure de proposer des définitions infiniment plus rigoureuses de la notion de fonction et établissent des distinctions utiles mais subtiles entre fonction, relation, application, loi, distribution, etc.

Ainsi l'équation $\vec{P} = m \cdot \vec{g}$ exprime mathématiquement le fait que le **POIDS** (une *grandeur vectorielle*) d'un **SYSTÈME** physique dépend (est fonction) de la masse du système notée ici par le symbole m (une *grandeur scalaire*) et $\vec{g}$ qui représente l'accélération de la **PESANTEUR**. En d'autres termes, le poids d'un système physique est le produit de sa masse et de l'accélération de la pesanteur au lieu considéré. Le poids est une grandeur vectorielle parce qu'il résulte du produit d'un scalaire avec une grandeur vectorielle. C'est donc la pesanteur qui confère à la force « poids » son orientation.

FORCE
N
Force

GRANDEUR vectorielle caractérisant un certain type d'interactions mécaniques entre éléments d'un **SYSTÈME** physique. Appliquer une force à un système revient à lui communiquer une accélération. Un moteur de fusée exerce une poussée qui confère à ladite fusée une accélération suffisante pour l'arracher à l'attraction terrestre. Cette

même attraction terrestre exerce un **CHAMP** de **PESANTEUR** communiquant à tous les corps qui y sont plongés une accélération. Au reste, l'intensité de la force est égale au produit de la masse du système considéré par l'accélération qu'il a reçue. Dans le *système d'unités SI*, une force se mesure donc en $kg \cdot m/s^2$. La force est une notion très importante en physique. Aussi lui a-t-on donné un nom particulier, le newton (noté N). On a donc la relation de définition : $1\,N \equiv 1\,kg \cdot m/s^2$. Le nom de cette unité est un hommage à Isaac NEWTON (1643-1727), le génial physicien anglais, dont l'ouvrage le plus célèbre publié en 1687, *Philosophiæ naturalis principia mathematica*, demeure un monument de la pensée scientifique. Pour les curieux, il faut signaler que l'ouvrage a été récemment réédité en français par Dunod (2005). Plus de trois siècles après avoir été rédigé, cette œuvre admirable continue de susciter par la clarté de ses exposés et la profondeur de ses vues, un incomparable objet de fascination.

FORCES FONDAMENTALES

Fundamental interactions

Forces à l'origine de tous les phénomènes étudiés par la physique. Dans l'état actuel des connaissances de la physique, il est admis de distinguer quatre **FORCES** (ou interactions) fondamentales :

- *l'interaction gravitationnelle* (ou *newtonienne*) qui permet de rendre compte des phénomènes d'attraction entre les masses ;
- *l'interaction électromagnétique* (ou *coulombienne*) responsable de la cohésion des **ATOMES** ;
- *l'interaction faible* qui permet d'interpréter les mécanismes des désintégrations radioactives ;
- *l'interaction forte* qui assure la cohésion des noyaux.

L'interaction gravitationnelle

L'interaction gravitationnelle est à l'origine de l'attraction entre les masses (→ **PESANTEUR**). C'est la plus faible des quatre forces fondamentales mais elle est cependant de portée infinie. Elle permet donc d'expliquer aussi bien la chute des pommes que l'évolution des astres dans l'Univers. Le vecteur de cette interaction serait l'hypothétique *graviton*.

L'interaction électromagnétique

Elle est responsable des mécanismes d'attraction et de répulsion entre charges électriques ainsi que les phénomènes de magnétisme. C'est donc elle qui permet d'expliquer la cohésion des atomes et des **MOLÉCULES**. Le vecteur de l'interaction électromagnétique est le *photon*, une particule sans masse et sans charge. Toute la chimie repose sur la seule interaction électromagnétique.

L'interaction faible

Son intensité est très faible et sa portée inférieure à 10^{-16} mètre. Elle est à l'origine de la transmutation des protons en neutrons et inversement. Les vecteurs de cette interaction seraient des particules dénommées W^+, W^- et Z^0 dites *bosons intermédiaires*.

L'interaction forte

Elle assure la cohésion entre les protons au sein des noyaux atomiques

en dépit de la répulsion électrostatique qui tend à repousser des particules de même charge. De fait, elle s'exerce entre les *nucléons* (*protons* et *neutrons*) indépendamment de leur charge électrique. Le vecteur de l'interaction forte est le *gluon*.

Se trouve-t-il un seul physicien au monde pour penser que ce qu'il est convenu d'appeler le *modèle standard* de la physique fondé sur les quatre interactions fondamentales citées, constitue l'aboutissement de leurs efforts ? Certainement pas. L'effort des théoriciens s'oriente aujourd'hui vers l'élaboration d'un modèle plus général encore baptisé par certains la Théorie de la Grande Unification à la sonorité quelque peu… métaphysique !

FRONTIÈRE
Boundary

Limite imaginaire de l'ensemble physique défini en tant que **SYSTÈME** analysé. Une identification et une comptabilisation des échanges entre le système et son environnement sont faites à cette frontière afin d'établir les **CONDITIONS AUX LIMITES**.

FUSION
Fusion, Melting

Phénomène de **CHANGEMENT D'ÉTAT** entre une phase solide et une phase liquide. Comme pour tous les changements d'état, la fusion nécessite qu'une certaine quantité d'**ÉNERGIE** soit fournie au corps initialement solide. Cette quantité d'énergie, qui dépend de la nature de la substance concernée et de sa **MASSE**, est appelée **CHALEUR LATENTE** de fusion.

G

GAZ
Gas

L'un des trois **ÉTATS** fondamentaux de la **MATIÈRE** avec l'état solide et l'état liquide (→ **CHANGEMENT D'ÉTAT**). Le mot « gaz » fut créé par le médecin et chimiste flamand Jan Baptist van HELMONT (1577-1644) en s'inspirant, dit-on, du latin *chaos*. Le mouvement aléatoire des **MOLÉCULES** constituant un gaz justifie, a posteriori, la dénomination choisie. On observe expérimentalement qu'un gaz occupe toujours *tout* le volume qui lui est offert.

Outre sa nature chimique, un gaz se caractérise par sa **TEMPÉRATURE** et sa **PRESSION**. Une loi fondamentale gouverne le comportement des gaz. Cette **ÉQUATION D'ÉTAT** indique que pour une certaine **MASSE** de gaz considérée, le produit de sa pression et de son **VOLUME** divisé par sa **TEMPÉRATURE ABSOLUE** est toujours constant (*équation des gaz parfaits*). En d'autres termes, dans une enceinte de volume défini et close de telle sorte qu'aucune molécule de gaz ne puisse entrer ou sortir, imposer une température au gaz revient à fixer sa pression. Inversement, modifier sa pression induira un changement de température parfaitement prévisible.

Au contraire des **SOLIDES** qui ne le sont jamais et des **LIQUIDES** qui le sont parfois, les **GAZ** sont toujours totalement miscibles. Même en l'absence de mouvement aéraulique, un gaz introduit en un point d'une enceinte contenant déjà un ou plusieurs gaz, va progressivement se disperser dans l'enceinte, par l'effet de l'agitation thermique

désordonnée des molécules, même si sa **MASSE VOLUMIQUE** à la température et la pression de l'enceinte est plus élevée que celle du ou des gaz déjà présents. Ce phénomène de **DIFFUSION** est irréversible au sens de la **THERMODYNAMIQUE**. Au bout d'un certain temps, toutes les substances gazeuses sont intimement mélangées et chacune exerce sa contribution, dite **PRESSION PARTIELLE**, dans la **PRESSION TOTALE** exercée par le mélange.

On appelle **LIBRE PARCOURS MOYEN** d'une molécule de gaz, la distance qu'elle parcourt entre deux chocs. Elle dépend de la taille des molécules et de la *densité particulaire* dans le volume considéré.

Lorsqu'un gaz est proche de son état de liquéfaction, il est souvent désigné par le terme de **VAPEUR**. C'est notamment le cas pour la vapeur d'eau.

GAZ PARFAIT

Ideal gas

Se dit d'un **GAZ** dont les **MOLÉCULES** ne présentent pas d'interactions notables entre elles, hormis les chocs dus à l'agitation thermique désordonnée, et dont le **VOLUME** propre des dites molécules est négligeable en regard des dimensions géométriques de l'enceinte qui contient le gaz. Dans l'absolu, la notion de « gaz parfait » est une idéalité physique. Cependant, les gaz atmosphériques peuvent être considérés comme des gaz parfaits avec une très bonne approximation.

L'intérêt de la notion de gaz parfait est qu'elle est décrite par des *lois physiques* très simples. On note P la **PRESSION** (en Pa), V le **VOLUME** (en m^3) et T la **TEMPÉRATURE ABSOLUE** (en K) :

- *Loi de Boyle-Mariotte.* À température constante, le produit de la pression et du volume est constant : $P \cdot V = \text{Cte}$.
- *Loi de Gay-Lussac.* À pression constante, le rapport du volume et de la température est constant : $V/T = \text{Cte}$.
  En d'autres termes, à pression constante, le volume d'un gaz varie proportionnellement à sa température absolue.
- *Loi de Charles.* À volume constant, le rapport de la pression et de la température est constant : $P/T = \text{Cte}$.
  En d'autres termes, à volume constant, la pression d'un gaz varie proportionnellement à sa température absolue.

Ces trois lois se synthétisent en une seule relation dite *équation des gaz parfaits* :

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T,$$

dans laquelle n est le nombre de moles dans le volume V considéré et R est la *constante des gaz parfaits* ($R = 8{,}31447\ \text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ pour tous les gaz). Cette constante est le produit de deux constantes fondamentales de la physique : le *nombre d'Avogadro* (→ **QUANTITÉ DE MATIÈRE**) $N_A = 6{,}02214 \cdot 10^{23}\ \text{mol}^{-1}$ et la *constante de Boltzmann* $k_B = 1{,}38065 \cdot 10^{-23}\ \text{J/K}$ (→ **ENTROPIE**).

Le produit $n \cdot R \cdot T$ qui apparaît dans le second membre de l'équation des gaz parfaits, ne dépend donc que du nombre de molécules

présentes dans le volume considéré. Ceci conduit à l'observation fondamentale que les relations entre pression, température et volume d'un système gazeux, sont totalement indépendantes de la nature du ou des gaz présents. Ce résultat peut être considéré comme une formalisation de la *loi d'Avogadro* qui stipule que deux volumes égaux de gaz différents, placés dans les mêmes conditions de température et de pression, contiennent exactement le même nombre de molécules.

On observera que le produit $P \cdot V$ qui apparaît dans la relation de *Boyle-Mariotte*, a la **DIMENSION** d'une **ÉNERGIE**. Ceci nous conduit à constater que la pression est une **GRANDEUR** analogue à une énergie par unité de volume.

GRADIENT

Gradient

Taux de variation d'une **GRANDEUR** en **FONCTION** d'une grandeur d'une autre nature. Toute variation d'une grandeur physique dépendant d'une autre grandeur considérée comme indépendante peut être représentée par un gradient. Ainsi, le gradient de **TEMPÉRATURE** dans un **SOLIDE** représentera la variation de température en fonction de la **LONGUEUR** considérée selon un axe. Le gradient de **PRESSION** atmosphérique en fonction de l'altitude correspond à la variation de la pression au fur et à mesure que l'on s'élève dans l'**ATMOSPHÈRE**.

GRANDEUR

≈ Physical quantity

Caractéristique physique mesurable d'un **SYSTÈME**. Une statuette, par exemple, est un objet concret. Sa **MASSE**, son **VOLUME**, sa **TEMPÉRATURE** constituent des grandeurs que l'on peut mesurer. L'expérience montre que des relations à caractère mathématique plus ou moins complexes peuvent être établies entre ces grandeurs. Ces relations sont représentatives des *lois physiques* sous-jacentes.

Du point de vue de leur représentation mathématique, les grandeurs se répartissent en deux grandes familles :

- Les *grandeurs vectorielles* : il s'agit de grandeurs directionnelles comme la vitesse, le **POIDS** (qui, rappelons-le, est une **FORCE**), le **CHAMP** électrique, etc. Mathématiquement, une grandeur vectorielle est représentée par l'association d'un nombre et d'un axe orienté, c'est-à-dire par un vecteur auquel elle emprunte sa représentation graphique. C'est pourquoi elle est le plus souvent notée par une lettre capitale surmontée d'une flèche symbolisant le vecteur. Exemple : une force pourra être notée $\vec{F}$.
- Les *grandeurs scalaires* : il s'agit de toutes les autres grandeurs comme le **TEMPS**, la masse, la température, etc. Mathématiquement, une grandeur scalaire est représentée par un nombre.

Du point de vue de leur nature, les grandeurs se répartissent également en deux familles :

- Les *grandeurs intensives* : on appelle ainsi les grandeurs indépendantes de la taille d'un système ou d'un composant d'un système. La température, la pression, la vitesse sont des

exemples de grandeurs intensives.

- Les *grandeurs extensives* : une grandeur est extensive si elle est une fonction de la taille d'un système ou d'un composant d'un système. La masse, le volume, l'énergie interne sont des grandeurs extensives.

On notera que les deux classifications ne se recoupent pas. En effet, la une grandeur intensive peut être de nature vectorielle ou scalaire au même titre qu'une grandeur extensive. La vitesse est un exemple de grandeur intensive et vectorielle. Le poids est à la fois une grandeur extensive et vectorielle. La masse est une grandeur extensive et scalaire. La pression est une grandeur intensive et scalaire.

H

HAUTEUR

°

Altitude angle

Distance angulaire entre la direction d'un astre et le plan de l'horizon au lieu d'observation (→ illustrations de l'article **AZIMUT)**. La valeur de la hauteur est comprise entre 0° (astre à l'horizon) et 90° (astre au zénith). Combinée avec l'azimut, la hauteur permet de situer précisément la position apparente d'un astre sur la voûte céleste. La hauteur d'un astre, comme l'azimut, dépend du mois, du jour et de l'heure, ainsi que des coordonnées géographiques (latitude et longitude) du point d'observation.

HUMIDITÉ ABSOLUE

kg_{eau}/m^3

Absolute humidity

Désigne le rapport entre la **MASSE** d'eau contenue dans un **VOLUME** d'**AIR HUMIDE** et le volume total de l'air humide avec lequel la **VAPEUR** est associée. Une des nombreuses façons de caractériser l'**HUMIDITÉ DE L'AIR**.

Cette appellation souffre d'un important défaut. Si l'on se contente de chauffer une certaine quantité d'air humide, la valeur de l'humidité absolue exprimée en kg_{eau}/m^3 change bien que l'on n'ait pas modifié la quantité de vapeur d'eau présente dans le mélange ! En chauffant l'air à **PRESSION** constante, on augmente son **VOLUME** (conséquence de la *loi de Gay-Lussac*). En faisant le rapport d'une quantité constante sur une grandeur plus importante, on obtient une valeur numérique plus petite. En d'autres termes, le nombre qui représente l'humidité absolue aura changé alors même que les quantités de vapeur d'eau et d'air présentes dans le mélange n'ont pas changé d'une seule **MOLÉCULE** ! Cette manière de caractériser l'humidité de l'air est donc source de confusion. Nous lui préférons la **GRANDEUR** appelée **RAPPORT DE MÉLANGE**.

HUMIDITÉ DE L'AIR

Air humidity

VAPEUR d'eau présente dans l'**AIR** atmosphérique. Outre de l'azote et de l'oxygène présents en proportions fixes, l'air atmosphérique contient également de la vapeur d'eau dans des proportions variables mais qui ne dépassent pas quelques pour cent en volume. Cependant, du fait de l'importante **CHALEUR LATENTE** qu'elle enferme, cette

vapeur d'eau exerce une forte influence sur les propriétés thermophysiques de l'air. Pour évaluer ces propriétés, il convient de donner une mesure de la présence de cette vapeur d'eau dans le mélange appelé « **AIR HUMIDE** ».

De nombreux paramètres ont été proposés pour caractériser la quantité de vapeur d'eau présente dans le mélange « air humide ». On peut établir la liste suivante :

- l'**HUMIDITÉ RELATIVE** ;
- le **DEGRÉ HYGROMÉTRIQUE** (ou degré de **SATURATION**) ;
- l'**HUMIDITÉ ABSOLUE** ;
- l'**HUMIDITÉ SPÉCIFIQUE** ;
- le **RAPPORT DE MÉLANGE** de l'air humide.

Selon les auteurs, les dénominations des **GRANDEURS** et leurs définitions peuvent varier ou être plus ou moins précises. Il convient de ne pas s'en affecter. L'essentiel est de porter une attention particulière à l'unité dans laquelle est exprimée la grandeur considérée, de façon à identifier sans ambiguïté la nature de la grandeur en question, indépendamment du nom qui lui a été donné.

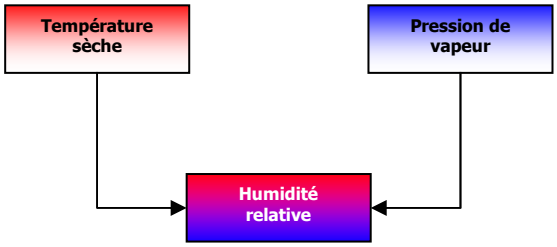
HUMIDITÉ RELATIVE

Relative humidity

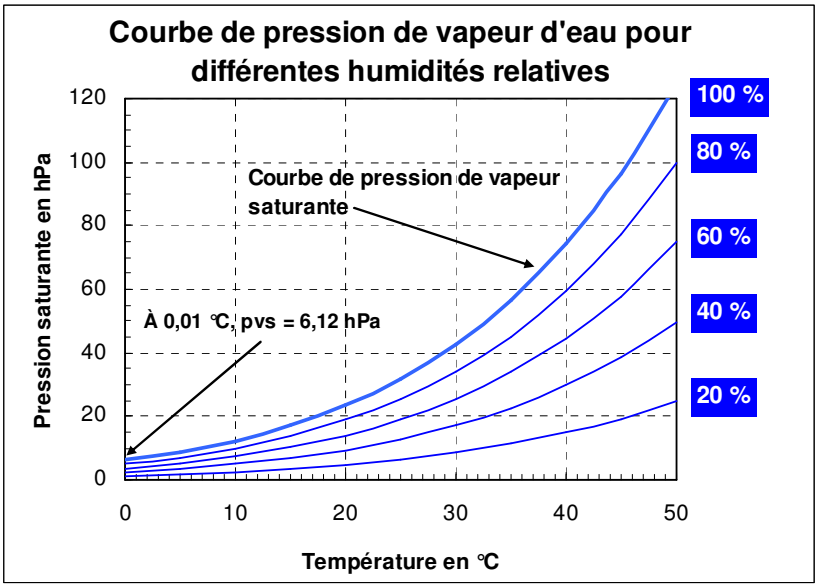
Rapport de la **PRESSION PARTIELLE** de **VAPEUR** d'eau présente dans une enceinte de **TEMPÉRATURE** déterminée à la **PRESSION DE VAPEUR SATURANTE** qui pourrait être atteinte dans la même enceinte et à la même température. S'exprime en pour cent.

Aux températures modérées rencontrées dans les bâtiments, la valeur de l'humidité relative est peu différente de celle du **DEGRÉ HYGROMÉTRIQUE**.

L'humidité relative est une **GRANDEUR** sans **DIMENSION** qui dépend à la fois de la pression partielle de vapeur effective dans l'ambiance mais aussi de la température (→ schéma ci dessous).



Il faut donc faire attention à l'interprétation de cette grandeur. Ainsi, le « moteur » d'un transfert hydrique entre deux ambiances n'est pas la différence entre les humidités relatives mais plutôt la différence des pressions partielles de vapeur d'eau qui s'exercent de part et d'autre d'une paroi. Ces pressions partielles sont déterminées soit graphiquement à l'aide d'un **DIAGRAMME PSYCHROMÉTRIQUE**, soit par le calcul.



Courbes de la pression de vapeur d'eau pour différentes humidités relatives. Par définition de l'humidité relative, la courbe 100 % coïncide avec la courbe de pression saturante. Ce graphique constitue un diagramme psychrométrique simplifié.

Supposons un local où la température de l'air est de 20 °C et l'humidité relative de 50 %. À l'extérieur, la température est de 0 °C et l'humidité relative de 80 %. Dans quel sens s'établira le transfert de vapeur d'eau ? La réponse correcte est de l'intérieur du local vers l'extérieur pour autant que la perméabilité de la paroi le permette. En effet, à l'intérieur, la pression partielle de vapeur sera de 1 178 Pa pour une *pression atmosphérique normale* tandis qu'à l'extérieur, elle ne sera que de 491 Pa.

HUMIDITÉ SPÉCIFIQUE

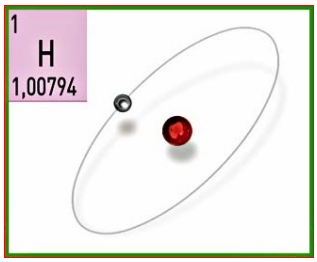
kg_{eau}/kg_{ah}

Specific humidity

Rapport entre la **MASSE** d'eau contenue dans un **VOLUME** d'**AIR HUMIDE** et la masse totale de l'air humide avec lequel la **VAPEUR** est associée. L'une des nombreuses façons de caractériser l'humidité de l'air mais aussi l'une des moins utilisées en France.

HYDROGÈNE

Hydrogen



L'élément hydrogène (Doc. CEA).

Premier élément dans la *table de Mendéleïev*, l'hydrogène est composé d'un seul *proton* et donc d'un seul *électron*. Il est par conséquent l'**ATOME** le plus léger de tous les corps existants. À l'échelle de l'univers, il est aussi le plus abondant en masse (75 %) et en nombre d'atomes (90 %). Il forme l'essentiel du cœur des étoiles (et donc de notre Soleil).

Ses deux *isotopes* les plus connus sont le deutérium (stable) et le tritium (radioactif → **RADIOACTIVITÉ**).

Sur Terre, l'hydrogène se présente soit seul, sous la forme d'un **GAZ**, le dihydrogène (H_2), mais il ne représente alors qu'une partie par million en volume dans l'**ATMOSPHÈRE**, soit en combinaison avec d'autres atomes. En s'oxydant, le dihydrogène donne une substance bien connue, l'**EAU** (H_2O). Il entre également dans la composition des matières organiques et notamment dans celle de la grande famille des hydrocarbures de formule générique C_mH_n comme le méthane CH_4, l'éthane C_2H_6, le propane C_3H_8, etc.

HYDROLYSE
Hydrolysis

Décomposition chimique d'un corps sous l'action de l'**EAU**. Ce phénomène est à l'origine de la destruction de nombreuses substances organiques telles que les protéines ou la cellulose.

HYDROPHILE
Hydrophilic

Se dit d'une substance qui présente une bonne affinité avec l'**EAU**. Cette propriété est liée à la capacité des **MOLÉCULES** de la substance d'établir des **LIAISONS HYDROGÈNE** avec les molécules d'eau. Il en résulte une forte **ADHÉSION** de l'eau à la surface de la substance ou une bonne miscibilité de la substance dans l'eau.

Certaines molécules présentent la particularité d'être composées de deux parties, l'une hydrophile, l'autre *lipophile* (miscible dans les corps gras). Dites *tensioactives*, elles sont utilisées pour réduire la tension superficielle de l'eau et favoriser ainsi sa capacité de *mouillage*.

HYDROPHOBE
Hydrophobic

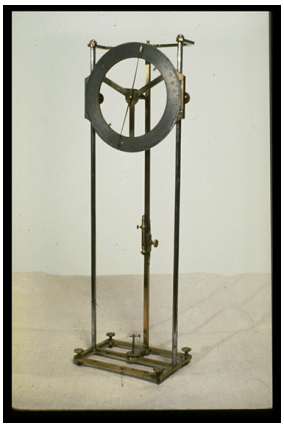
Se dit d'une substance sans affinité avec l'**EAU**. Les hydrocarbures sont de bons exemples de substances hydrophobes. Le mécanisme de l'*hydrophobie* (ou *interaction hydrophobe*) est une conséquence de la structuration de l'eau par les **LIAISONS HYDROGÈNE**. Ne pouvant engager de liaison avec l'eau, les particules hydrophobes auront tendance à se grouper pour former des inclusions homogènes entourées d'eau (→ **DISPERSION**), les molécules d'eau créant de véritables cages polyédriques autour des substances hydrophobes. Si deux inclusions se rapprochent suffisamment, elles finiront par se réunir afin de minimiser la surface en contact avec l'eau. L'hydrophobie d'un solide induit la non-**MOUILLABILITÉ** de sa surface.

HYGROMÉTRIE
Hygrometry

Du gr. *hugros* « humidité » et *metron* « mesure ». **MÉTROLOGIE** spécifique de la vapeur d'eau présente dans un espace particulier (l'atmosphère, un local, une boîte…). Le terme est également employé pour désigner l'**HUMIDITÉ DE L'AIR** elle-même.

L'appareil de mesure est nommé *hygromètre*. La mise en évidence de l'humidité de l'air est relativement ancienne. Les chroniques historiques témoignent des efforts faits par le passé pour mettre en lumière les variations de cette humidité. Cependant, l'inventeur du premier hygromètre, capable donc de réellement mesurer l'hygrométrie relative, fut un physicien suisse, Horace-Bénédict de SAUSSURE (1740-1798), qui, dans son *Essai sur l'hygrométrie* de 1783, conçut et décrivit un hygromètre à cheveu dont s'inspirèrent par la suite de nombreux physiciens.

Les illustrations ci-dessous montrent des hygromètres à cheveu du XIX^e^ siècle.



Hygromètre de H.-B. de Saussure (Doc. Collège de Saussure).

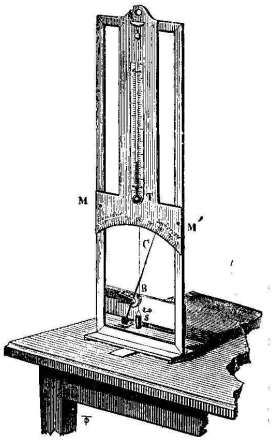


Fig. 257. — Hygromètre à cheveu.

(DR).

Thermohygromètre numérique de nouvelle génération capable d'enregistrer plus de 30000 couples de température sèche et l'humidité relative (Doc. Testo).

De nombreux autres appareils ont été proposés depuis. Le plus emblématique de ceux qui sont utilisés dans les espaces patrimoniaux est l'hygrographe à tambour dont un des premiers modèles datant des années 30 figure ci-après :

Doc. Bibliothèque de Downsview, Canada.

Aujourd'hui, l'époque des appareils à mécanisme est révolue. Leurs défauts (fragilité, coût élevé, fiabilité incertaine, constante de temps trop grande) sont trop importants pour ne pas masquer leurs qualités (simplicité, affichage direct). Ils sont en passe d'être détrônés par des appareils enregistreurs numériques devenus très bon marché et facile à utiliser.

HYGROSCOPICITÉ

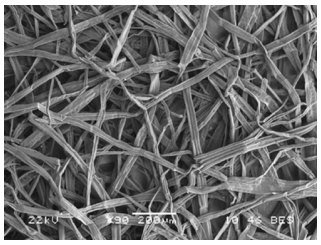
Hygroscopicity

Propriété de certains **SOLIDES** à retenir une plus ou moins grande quantité d'eau en phases liquide et gazeuse. De nombreuses caractéristiques du solide contribuent à cette propriété. Pour être qualifié d'hygroscopique un **MATÉRIAU** doit posséder les caractères suivantes :

- il doit être poreux ;
- la **POROSITÉ** doit être ouverte ;
- la taille des pores doit autoriser la **CAPILLARITÉ** (majorité de *nano*, *micro* et *mésopores*).

Tous les matériaux poreux ne sont pas hygroscopiques (le verre cellulaire est un isolant poreux non hygroscopique). Les matériaux hygroscopiques peuvent être organiques (bois, …) ou minéraux (pierre calcaire, …).

L'hygroscopicité combine **ADSORPTION** (*physisorption*) et **CAPILLA-**



Surface d'une feuille de papier, matériau hygroscopique par excellence (Doc. C. Tremblay).

RITÉ. Lorsque la capillarité est très active, le volume entier du matériau va être concerné. On pourra alors parler d'**ABSORPTION**. Les échanges de vapeur d'eau entre l'objet hygroscopique et son ambiance sont commandés par l'**ÉQUILIBRE** de la **PRESSION DE VAPEUR** entourant l'objet et les forces d'adsorption entre la vapeur et le solide.

À température constante, si la pression de vapeur augmente autour d'un objet hygroscopique, celui-ci aura tendance à augmenter son contenu en eau. Si elle diminue, son contenu en eau diminuera également. À pression de vapeur constante, si la température augmente, l'objet aura tendance à rejeter de la vapeur d'eau. Si la température baisse, il aura tendance à en gagner.

HYSTÉRÉSIS

Hysteresis

Phénomène de dépendance de l'état physique d'un corps en fonction d'états antérieurs. Il se manifeste souvent par un écart de l'effet vis-à-vis de la cause selon que la cause croît ou décroît. Ce phénomène se rencontre par exemple lors de processus d'aimantation d'un solide métallique ou lors d'un cycle d'humidification-déshumidification d'un matériau hygroscopique. On observe également un phénomène d'hystérésis dans la relation contrainte-déplacement lors de la déformation plastique d'un solide.

I

INERTIE

Inertia

Propriété d'un corps se traduisant par une certaine « résistance » au changement de position, de vitesse, de température, etc. On distinguera l'*inertie mécanique*, l'*inertie chimique* et l'*inertie thermique*.

Inertie mécanique. Livré à lui-même, un corps ne peut modifier seul sa vitesse. S'il est au repos, il y demeure. S'il est en mouvement, il le poursuit sans changement. Pour modifier la vitesse d'un corps, il convient d'exercer une force extérieure à ce corps. Les historiens des sciences s'accordent à considérer que c'est l'immense Isaac NEWTON qui aurait, le premier, formulé clairement ce principe d'inertie. Voici comment Isaac NEWTON s'exprime à ce sujet :

> « […] car l'inertie est ce qui fait qu'on ne peut changer sans effort l'état actuel d'un corps, soit qu'il se meuve, soit qu'il soit en repos, ainsi on peut donner à la force qui réside dans les corps le nom très expressif de *force d'inertie*. »
>
> I. NEWTON. – *Principia – Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, Dunod, Paris, 2005, p. 4.

Cette inertie mécanique est directement à la **MASSE** du corps considéré.

Inertie chimique. Lorsqu'une substance manifeste une faible réactivité chimique, on dit qu'elle est *inerte*. Ainsi, de nombreux gaz sont qualifiés d'inertes au sens où ils ne provoquent pas d'oxydation. Cette belle propriété est mise à profit en conservation. En remplacement de l'air, l'azote pur peut être utilisé dans des vitrines afin d'éviter les dégradations d'objets fragiles (métaux, matériaux organiques…).

Inertie thermique. Les matériaux sont capables de stocker de l'énergie thermique sous forme de chaleur, autrement dit d'énergie cinétique des molécules qui les constituent. Conformément au *Principe zéro* de la thermodynamique, un corps placé dans une ambiance à une certaine température maintenue constante, recherchera un équilibre avec cette ambiance et atteindra donc la même température. Plus le stock d'énergie interne initiale du corps sera importante, plus il lui faudra de temps pour atteindre cet équilibre. En ce cas, on dira que ce corps est doté d'une grande inertie thermique. Celle-ci est proportionnelle à d'une part la masse du corps, notée en kg, et, d'autre part, la **CHALEUR MASSIQUE** de ce corps, exprimée en $J/(kg \cdot K)$, qui dépend de la nature du matériau constitutif.

ION

Ion

ATOME (ou **MOLÉCULE**) ayant perdu ou gagné un ou plusieurs *électrons* dans certaines situations (mise en solution, chauffage à très haute température, impact avec une particule très énergétique, etc.). Ce phénomène est nommé *ionisation*. La charge de l'ion est indiquée par un ou plusieurs signes + ou – disposés en exposant à droite du symbole de l'élément. Ainsi, l'ion positif (*cation*) calcium est noté Ca^{++}, l'ion négatif (*anion*) chlore, Cl^{-}. Excellent solvant, l'eau est capable de dissocier des molécules (de sel par exemple), en formant des **SOLUTIONS** ioniques électriquement neutres mais où se déplacent librement des porteurs de charges positives ou négatives, les ions. C'est la raison pour laquelle l'eau minéralisée est un bien meilleur conducteur électrique que l'eau chimiquement pure.

ISOLATION

Insulation

Ensemble des dispositions adoptées pour réduire le transfert de **CHALEUR** ou de charge électrique dans un système. Dans le premier cas, on parlera d'*isolation thermique*, dans le second d'*isolation électrique*. Un **MATÉRIAU** présentant un bon niveau d'isolation sera qualifié d'isolant. Le mot *isolant* est à la fois un adjectif et un substantif. On dira indifféremment « un matériau isolant » ou « un isolant ».

La notion d'isolation thermique ne doit pas être confondue avec celle d'**INERTIE** thermique. Un matériau isolant peut présenter une très faible inertie. C'est le cas de la plupart des isolants utilisés dans les bâtiments. Par ailleurs, une substance très inerte peut être faiblement isolante. Les pierres de construction sont de bons exemples de cette situation.

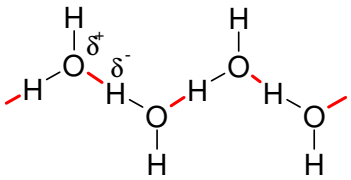
L

LIAISON HYDROGÈNE

Hydrogen bond

Interaction électrostatique entre molécules qui, par sa nature, n'est pas fondamentalement différente de celles à l'origine des **FORCES DE VAN DER WAALS**. Sa particularité tient à ce qu'elle implique la présence d'**ATOMES** d'hydrogène dont la très petite taille favorise un rapprochement très grand des **MOLÉCULES**. L'interaction est donc très forte et l'**ÉNERGIE** mise en jeu plus importante que dans le cas des

interactions où s'exercent les *forces de Keesom* et de *Debye* (de 5 à 10 fois plus élevée). Autre particularité : les liaisons hydrogène s'établissent dans des directions privilégiées de l'espace moléculaire. Un bon exemple en est fourni par l'**EAU** comme l'illustre le schéma suivant :



Dans la figure précédente, les liaisons rouges représentent les liaisons hydrogène qui unissent les molécules d'eau. Celles-ci se comportent comme des dipôles tentant de s'assembler par combinaison de leur pôle positif δ^+ et négatif δ^-. De fait, la structuration de l'eau liquide par les liaisons hydrogène conduit à des motifs tétraédriques tels que chaque molécule d'eau est entourée de quatre autres molécules.

Avec des valeurs généralement comprises entre 10 et 30 kJ/mol, l'énergie des interactions moléculaires dues à la liaison hydrogène, bien que supérieure à celle mise en jeu dans les forces de Van der Waals, demeure faible en regard des énergies de 100 et 1000 kJ/mol mises en jeu par les *liaisons covalentes* qui solidarisent les atomes à l'intérieur de la molécule.

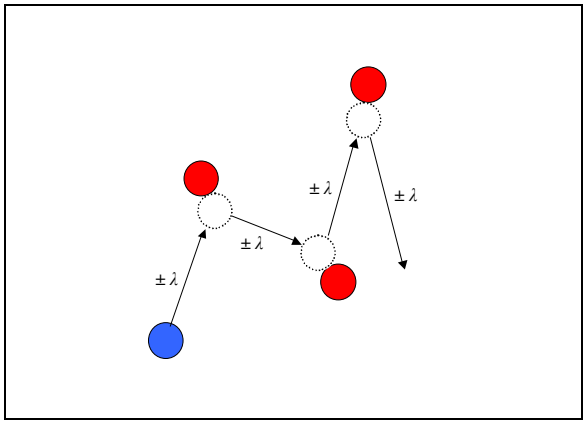
Les liaisons hydrogène entre molécules d'eau sont responsables d'une importante propriété appelée *interaction hydrophobe* (→ **HYDROPHOBE**).

LIBRE PARCOURS MOYEN

µm

Mean free path

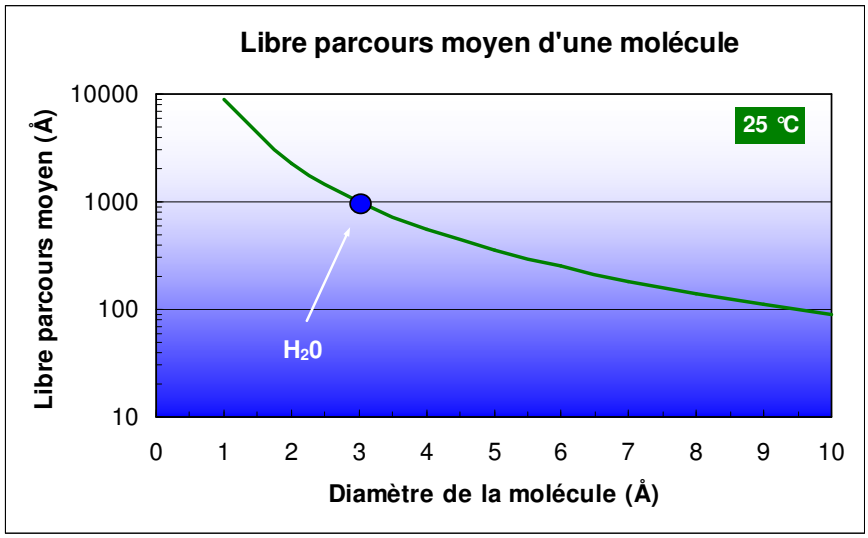
Distance moyenne λ parcourue par une **MOLÉCULE** de **GAZ** entre deux collisions. Le libre parcours moyen dépend de la taille des molécules et de la densité particulaire dans le **VOLUME** considéré. Aux **TEMPÉRATURE** et **PRESSION** habituelles, le libre parcours moyen des molécules de gaz est voisin de 1 µm pour une molécule de diamètre $\sigma = 1$ Å et de 0,01 µm pour une molécule de diamètre $\sigma = 10$ Å.



Représentation schématique d'une succession de collisions entre une molécule d'un gaz et les autres.

La *densité particulaire normale* (nommée également *nombre de Loschmidt*) est $n_0 = N_A/V_0$ où N_A est le *nombre d'Avogadro* ($6{,}02214 \cdot 10^{23}$ mol^{-1}) et V_0 le **VOLUME MOLAIRE** normal (c'est-à-dire considéré aux **CONDITIONS NORMALES**) soit $22{,}4136 \cdot 10^{-3}$ m^3/mol. La densité particulaire

normale vaut donc $n_0 = 2{,}6868 \cdot 10^{25}$ m^{-3}.



Comme la densité particulaire est proportionnelle à la pression, il s'en suit que le libre parcours moyen est inversement proportionnel à la pression mais proportionnel à la température.

En appliquant la *théorie cinétique des gaz*, on peut calculer le libre parcours moyen en fonction du diamètre moléculaire comme le montre le graphe précédent.

Ces distances peuvent paraître très faibles. Il faut les rapprocher de la taille des molécules. Calculons le rapport λ/σ pour une molécule de taille 3 Å, diamètre approximatif d'une molécule d'eau. Il vaut environ 330. En d'autres termes, la molécule va parcourir en moyenne 330 fois son diamètre avant de percuter une autre molécule. Si la molécule avait la taille d'une boule de billard, il faudrait qu'elle parcoure en moyenne 15 m en ligne droite avant de percuter une autre boule !

LIQUÉFACTION

Condensation, Liquefaction

CHANGEMENT D'ÉTAT d'une substance gazeuse passant à l'état **LIQUIDE**. Le terme de **CONDENSATION** est parfois utilisé pour décrire ce phénomène. Pour éviter toute ambigüité, il vaudrait mieux préciser alors *condensation liquide*.

Attention ! Les géologues utilisent parfois ce terme pour désigner un phénomène de déconsolidation brutale suite à un séisme, des matériaux constitutifs d'un terrain (*soil liquefaction*), engendrant une instabilité des constructions sur lequel elles reposent.

LIQUIDE

Liquid

L'un des trois **ÉTATS** fondamentaux de la **MATIÈRE** correspondant à des niveaux moyens d'**ÉNERGIE** interne. Il est intermédiaire entre celui des **SOLIDES** et celui des **GAZ**. Les forces de **COHÉSION** entre les **MOLÉCULES** organisées en liquide sont insuffisantes pour que le liquide ait une forme propre. Cependant, la proximité des molécules est telle que les liquides présentent en général une très faible compressibilité.

Sous l'action de la pesanteur, les liquides épousent donc la forme de leur contenant en développant une surface libre qui n'est dite horizontale que par simplification. Dans le référentiel de notre planète, la surface libre d'un liquide est une surface sphéroïdale dont le centre de courbure coïncide avec le centre de *gravité* de la Terre. La courbure des océans est une évidence pour les marins. À l'échelle de notre vie quotidienne, par commodité, on considère les surfaces liquides libres comme étant parfaitement plane.

LONGUEUR

m

Length

DIMENSION essentielle de tout **SYSTÈME** physique. La longueur est l'une des sept **GRANDEURS** fondamentales du *système SI*. Elle s'exprime en mètre. Cette grandeur caractérise l'étendue spatiale d'un système dans une seule direction de l'espace. Elle peut prendre le sens de distance pour mesurer l'éloignement relatif de deux points.

Les surfaces (exprimées en m^2) et les volumes (exprimés en m^3) sont des grandeurs dérivées de la longueur. Par combinaison de deux longueurs, la *surface* exprime la taille d'un système dans un espace à deux dimensions. Le *volume* caractérise la taille d'un système physique dans un espace à trois dimensions. Sa dimension est celle du produit de trois longueurs.

Longueurs, surfaces et volumes sont des *grandeurs extensives*.

LUMIÈRE

Light

Au sens strict, **RAYONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE** perceptible par l'œil humain dont le **SPECTRE** est compris entre 380 et 780 nm (*rayonnement visible*). De très nombreux phénomènes physiques ou chimiques peuvent être à l'origine de la production de lumière.

L'*incandescence* est sans doute le plus commun. Toute substance qui n'est pas au *zéro absolu*, émet un rayonnement électromagnétique dont la *longueur d'onde* est une fonction de sa **TEMPÉRATURE**. Quand la température du corps est suffisamment élevée (supérieure à 500 °C), le rayonnement induit se rapproche du spectre visible. Un filament métallique (tungstène) placé dans une ampoule en verre où règne un vide suffisant, et traversé par un courant électrique, atteint une température supérieure à 2000 °C. Il produit alors un rayonnement dont le spectre est pour partie visible.

La *luminescence* correspond à une émission de lumière par des **SOLIDES**, des **LIQUIDES** ou des **GAZ** à la suite de réactions chimiques ou bien après **ABSORPTION** de *photons*, d'*électrons* ou de particules chargées. La *fluorescence* est un phénomène très similaire mais le rayonnement émis par la substance excitée n'est pas visible. Une lampe fluorescente nous éclaire par un double mécanisme. La lampe est remplie d'une vapeur de mercure à basse **PRESSION**. Des électrodes disposées dans la lampe provoquent une décharge électrique dans le gaz, induisant l'émission d'un rayonnement dont le spectre est essentiellement dans l'*ultraviolet* (invisible). Ce rayonnement est absorbé par la paroi interne de la lampe sur laquelle des substances luminescentes ont été déposées. Ce sont donc elles qui, in fine, produisent un rayonnement visible.

La *phosphorescence* est un phénomène de luminescence qui se prolonge

après que l'excitation initiale a disparu. Cette rémanence du phénomène va de quelques fractions de seconde (tubes cathodiques) à plusieurs heures (cadrans lumineux d'horloge, signalisation de sécurité).

La vitesse de propagation de la lumière (parfois dénommée *célérité*) dépend du milieu qu'elle traverse. Dans le vide, la vitesse de la lumière notée c, a une valeur considérée comme une constante fondamentale :

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}.$$

M

MASSE

kg

Mass

GRANDEUR physique fondamentale caractéristique de tout ensemble matériel. À ne surtout pas confondre avec la notion de **POIDS,** le poids n'étant rien d'autre qu'une **FORCE**. Par le passé, la masse était désignée par l'expression « *quantitas materiæ* ». Ce concept de **QUANTITÉ DE MATIÈRE** est aujourd'hui pris en compte par une unité spécifique : la mole, l'une des unités fondamentales du *Système SI*.

Prototype de l'étalon de masse en platine irridié (Doc. BIPM).

L'unité de masse est le kilogramme l'une des sept unités fondamentales du *Système SI*. Elle est la seule à commencer par un préfixe, en l'occurrence kilo qui vaut 1000 (10^3).

Pour un système matériel donné, la masse est une *grandeur extensive* constante (sauf pour les substances *radioactives* !) pouvant revêtir deux aspects : gravitationnel (les masses s'attirent entre elles) et inertiel (une masse « s'oppose » à son déplacement, → **INERTIE**). C'est au demeurant grâce au phénomène de la **PESANTEUR** lié à l'attraction de la Terre, que la masse est mesurable.

Il revient à Albert EINSTEIN (prix Nobel 1921) d'avoir montré en 1905 que la masse m d'un corps était une mesure de son **ÉNERGIE** intrinsèque E, et d'avoir proposé la célèbre relation $E = m \cdot c^2$ dans laquelle c désigne la *vitesse de la lumière* ($c = 2{,}99792458 \cdot 10^8$ m/s dans le **VIDE**). Cette formule permet d'évaluer la quantité phénoménale d'énergie que recèle la **MATIÈRE**. La disparition d'un seul milligramme de matière induit la génération d'une quantité d'énergie égale à $9 \cdot 10^{10}$ J, soit la possibilité théorique de chauffer plus de 200 tonnes d'eau de 0 à 100 °C !

MASSE MOLAIRE

g/mol

Molar mass

MASSE d'une mole de **MATIÈRE**. La masse molaire est donc le produit de la masse de la particule de matière considérée et du *nombre d'Avogadro*. Si l'entité considérée est un atome, sa masse molaire en g/mol s'exprime avec le même nombre que sa *masse atomique relative*.

Ainsi, si on considère l'**AIR SEC** comme un **GAZ** homogène, on peut définir sa masse molaire à partir de celle de ses trois principaux composants :

- l'azote (78 %): $M_{N_2} = 28$ g/mol ;

- l'oxygène (21 %) : M_{O_2} = 32 g/mol ;
- l'argon (1 %) : M_{Ar} = 39,9 g/mol.

Un calcul simple de proportions nous donne la masse molaire de l'air : M_{air} = 28,96 g/mol arrondi à 29 g/mol.

MASSE VOLUMIQUE

kg/m³

Specific mass

Rapport de la **MASSE** d'une substance à son **VOLUME**. Il faut se souvenir que si la masse d'une certaine **QUANTITÉ DE MATIÈRE** est invariable, il n'en est pas de même du volume qui, même pour un **SOLIDE**, change avec la **TEMPÉRATURE**. La masse volumique est donc une **GRANDEUR** variable. L'inverse est appelé **VOLUME MASSIQUE**.

Bien entendu, les gaz ont une masse volumique au même titre que les **LIQUIDES** et les solides. La différence notable avec ces derniers tient à la grande compressibilité et dilatabilité des gaz qui font de leur masse volumique une grandeur très variable. L'indication de la masse volumique d'un gaz n'a de sens qu'en précisant pour quelle température et quelle **PRESSION** elle est donnée. Ceci est une conséquence directe de la loi des **GAZ PARFAITS**.

(DR).

Afin de fixer des ordres de grandeur, voici quelques valeurs de masse volumique considérées aux **CONDITIONS NORMALES** :

- granit : 2 500 kg/m³ ;
- eau : 1 000 kg/m³ ;
- air sec : 1,3 kg/m³.

La masse volumique de l'air peut paraître négligeable. De fait, elle ne l'est pas. Le cylindre d'air qui « contient » la Tour Eiffel (hauteur : 300 m, base : 125 x 125 m) représente une masse supérieure à celle de la Tour elle-même : 9 300 tonnes contre 8 000 tonnes !

MATÉRIAU

Material

Se dit d'une **MATIÈRE** utilisable pour la fabrication d'objets ou de bâtiments.

MATIÈRE

Matter

Édifice plus ou moins complexe constitué d'**ATOMES**. Par convention, les *électrons*, les *protons* et les *neutrons* formant les atomes seront considérés non comme de la matière à proprement parler, mais comme les constituants fondamentaux de la matière. En accord avec la découverte d'EINSTEIN prouvant l'existence d'une relation fondamentale entre la **MASSE** et l'**ÉNERGIE**, on peut considérer que ces deux grandeurs sont probablement les deux visages de la réalité unique formant notre univers. La matière pourrait donc être vue comme une forme « condensée » de l'énergie.

La matière possède de nombreuses propriétés que la **PHYSIQUE** et la **CHIMIE** se sont donné pour objectif d'étudier. Une des **GRANDEURS** de base d'une certaine quantité de matière est sa masse exprimée en kilogramme. On peut également exprimer la **QUANTITÉ DE MATIÈRE** en *mole* (unité de base du *Système SI ;* symbole : mol), ce qui revient à dénombrer les entités élémentaires (**ATOMES**, **MOLÉCULES**, **IONS**, etc.)

constituant le **SYSTÈME** matériel considéré.

MÉTÉORE

Meteorological phenomenon

Du gr. *meteôros*, « élevé dans les airs ». Tout phénomène se manifestant dans l'atmosphère. Dans le sens courant, phénomène lumineux induit par la pénétration dans l'atmosphère de corps solides provenant de l'espace. Ces corps ou fragments de corps sont nommés *météorites*.

« *[…] conduisant les vapeurs par l'air, j'examinerai d'où viennent les vents. Et les faisant assembler en quelques endroits, je décrirai la nature des nues. Et faisant dissoudre ces nues, je dirai ce qui cause la pluie, la grêle et la neige, […] je n'oublierai pas aussi les tempêtes, le tonnerre, la foudre et les divers feux qui s'allument en l'air, ou les lumières qui s'y voient.* » Ainsi s'exprimait le grand René DESCARTES (1596-1650) dans l'essai *Les météores* qu'il avait écrit en 1637 en application de son *Discours de la Méthode*. À l'instar du philosophe inventeur du « doute méthodique », les météorologistes ont entrepris de recenser et de classer les nombreux phénomènes qui se produisent dans l'atmosphère. Le tableau suivant en propose un échantillon.

Famille de météores	Météores
Lithométéores	Brume sèche, chasse-poussière, etc.
Hydrométéores	Nuage, pluie, neige, grêle, grésil, etc.
Électrométéores	Foudre, tonnerre, aurore boréale, etc.
Photométéores	Couleur du ciel, arc-en-ciel, etc.

La plupart des lithométéores et hydrométéores sont liés à la présence d'**AÉROSOLS** dans l'atmosphère.

MÉTÉOROLOGIE

Meteorology

Étude des **MÉTÉORES**. En ce sens strict, la météorologie est une branche de la **CLIMATOLOGIE**. Au sens courant, la météorologie désigne un ensemble d'activités comprenant notamment la prévision du temps à court terme.

MÉTROLOGIE

Metrology

Du gr. *metron* « mesure ». Science (et parfois art !) de la mesure des **GRANDEURS** physiques. Toute mesure nécessite le choix d'un appareil de mesure qui, d'une manière ou d'une autre, va influer sur le phénomène mesuré. Par ailleurs, aucun dispositif de mesure ne peut être considéré comme parfait. Il convient donc de tenir compte dans le résultat de la mesure, de l'erreur instrumentale introduite par l'appareil utilisé, erreur qui, en toute rigueur, doit être évaluée et mentionnée. Les procédures de mise en œuvre des appareils de mesure entraînent également des erreurs attribuables cette fois-ci à l'opérateur. Elles aussi devront être évaluées. On rappellera que toute mesure doit être exprimée par une valeur numérique qui ne prend son sens qu'accompagnée d'une plage d'erreur probable et d'une indication d'unité.

Selon les disciplines concernées, la métrologie porte un nom plus spécialisée : **THERMOMÉTRIE**, **HYGROMÉTRIE**, *photométrie*, *colorimétrie*, *porométrie*, etc.

MODÈLE

Model

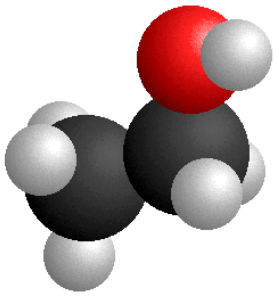
Représentation mathématique d'un **SYSTÈME** physique en vue de son analyse par **SIMULATION**. Le modèle sera dit **STATIQUE** si les **CONDITIONS AUX LIMITES** influant sur le système sont supposées constantes dans le **TEMPS**. Dans le cas contraire, le modèle est qualifié de **DYNAMIQUE**.

MOLÉCULE

Molecule

Assemblage plus ou moins complexe d'**ATOMES**. Une molécule peut contenir de deux (par exemple la molécule d'hydrogène H_2) à plusieurs milliers d'atomes (molécules organiques).

Les *liaisons chimiques* entre atomes sont réalisées par la mise en commun d'*électrons*. On parle alors de *liaisons covalentes*. Ce sont les électrons situés sur les couches périphériques de l'atome qui participent aux liaisons. Plus l'**ÉNERGIE** nécessaire pour arracher un électron à un atome est faible (*énergie d'ionisation*), plus l'atome sera considéré comme réactif.



Molécule d'éthanol (Doc. IUFM, Grenoble).

Lorsque les deux atomes liés par covalence sont identiques (cas par exemple de la molécule d'hydrogène ou d'oxygène), le doublet d'électrons mis en commun de trouve, en moyenne, à égale distance des deux noyaux d'atomes. L'édifice moléculaire est alors parfaitement neutre sur le plan électronique. Il n'en va pas de même dans le cas de la plupart des liaisons hétéronucléaires qui se traduisent par une asymétrie électronique, source d'une polarisation de la molécule. Dans cette situation, certains auteurs parlent de *liaison ionique*. De fait, il n'existe que des liaisons covalentes plus ou moins polarisées.

On observera que les propriétés d'une molécule sont le plus souvent très différentes de celles de substances constitutives. Prenons le cas d'une molécule très simple que nous utilisons tous les jours pour assaisonner nos plats, le chlorure de sodium, NaCl. Elle résulte de l'association d'un atome de sodium et d'un atome de chlore. Le sodium est un métal mou, modérément toxique mais extrêmement réactif. Au contact de l'eau, une réaction très exothermique se produit qui permet à l'hydrogène dégagé dans la réaction de s'enflammer, voire d'exploser. Les feux de sodium sont très difficiles à éteindre. Pour sa part, aux **CONDITIONS NORMALES**, le chlore est un gaz très réactif lui aussi. Puissant désinfectant, il est aussi très toxique. Pourtant, associées sous forme de chlorure de sodium, ces deux substances deviennent non seulement stables et inoffensives mais aussi très bénéfique. Le chlorure de sodium a longtemps été indispensable pour la conservation des aliments. On a également découvert qu'il jouait un rôle fondamental dans l'équilibre ionique cellulaire des organismes vivants.

MOUILLABILITÉ

Wetting

Propriété de surface d'un **SOLIDE** vis-à-vis d'un **LIQUIDE**. Le phénomène d'étalement d'un liquide sur une surface est appelé *mouillage*. En général, un matériau **HYDROPHILE** sera mouillable tandis qu'un matériau **HYDROPHOBE** ne le sera pas. La rugosité de la surface joue un rôle non négligeable. Sur un substrat hydrophile, une surface rugueuse entraînera une plus forte mouillabilité. Au contraire, sur un

substrat hydrophobe, une rugosité accrue se traduira par une hydrophobie plus grande.

La mouillabilité d'une surface peut être augmentée ou diminuée par un traitement approprié consistant à déposer sur la surface concernée un film moléculaire approprié. La mouillabilité d'une surface hydrophile peut être considérablement réduite par la déposition de Téflon® (polytétrafluoroéthylène, PTFE). L'opération inverse est réalisée par le greffage de groupes hydrophiles à la surface des matières plastiques pour augmenter leur mouillabilité.

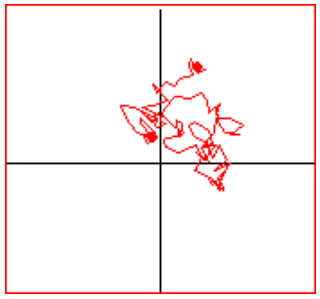
On appelle *démouillage*, le retrait spontané d'un film liquide sur une surface hydrophobe.

MOUVEMENT BROWNIEN

Brownian motion

Mouvement aléatoire de particules en suspension dans un fluide. Découvert en 1827 par un botaniste écossais, Robert BROWN, ce mouvement résulte des chocs incessants reçus par les particules de la part des molécules du fluide. Ce phénomène qui aurait pu demeurer une curiosité de laboratoire est devenu au fil du temps l'une des mines d'idées les plus fécondes pour la physique et les mathématiques. En 1905, *annus mirabilis* pour la physique, Albert EINSTEIN (1879-1955, prix Nobel 1921), alors âgé de 26 ans, publie quatre articles visionnaires consacrés aux thèmes de la relativité, de l'équivalence matière et énergie, de la nature discontinue de la **LUMIÈRE**, et de l'origine thermique du mouvement désordonné des atomes. Ces sujets seront les axes majeurs de toute la recherche en physique pendant le XXe siècle !

Albert Einstein (1879-1955) en 1912 (DR).



Simulation du mouvement brownien d'une particule

Dans l'article qui nous intéresse ici (*Annalen der Physik,* vol. 17, pp. 549-560), il postule l'existence d'un mouvement désordonné des molécules d'origine thermique. L'année suivante, en 1906 donc, il montre qu'on peut déduire du mouvement des particules une détermination des dimensions moléculaires. Ces spéculations théoriques recevront une éclatante confirmation expérimentale grâce aux recherches du français Jean PERRIN (1870-1942), travaux qui lui vaudront le prix Nobel de physique en 1926.

N

NOMBRE

Number

Être mathématique permettant un recensement d'éléments de même nature. Ces éléments peuvent être des entités extrêmement concrètes : des cailloux, des choux, des moutons, des individus… Mais ils peuvent aussi présenter un très grand degré d'abstraction. Ainsi, des nombres peuvent servir à compter des ensembles… de nombres !

Les nombres les plus simples sont les *entiers naturels* dont l'ensemble est noté ⅂. Puis viennent, par ordre de généralité croissante, les *nombres entiers relatifs* (ℤ), les *nombres rationnels* (ℚ), les *nombres réels* (⅁) et les *nombres complexes* (⅄).

NUAGE

Cloud

AÉROSOL de microgouttelettes d'eau dans une masse d'**AIR HUMIDE** saturée sans contact avec le sol naturel. Lorsque le nuage est au sol on le dénomme plutôt **BROUILLARD**. Le diamètre de ces gouttelettes est en général compris entre 2 et 10 µm soit nettement plus que la longueur d'onde de la lumière visible. Ces gouttelettes peuvent donc diffuser la totalité du spectre visible. C'est la raison pour laquelle les nuages nous paraissent blancs. Lorsque la couleur d'un nuage s'assombrit, c'est que son épaisseur et la surface qu'il recouvre sont telles que la lumière solaire transmise est notablement affaiblie.

Jeux complexes de diffusion, transmission, réflexion de la lumière dans un nuage.

On doit à Luke HOWARD, jeune pharmacien anglais et météorologue amateur, d'avoir proposé en 1802 une classification des nuages et de les avoir baptisés. Aujourd'hui encore ces noms sont d'usage courant : stratus, cumulus, cirrus…

O

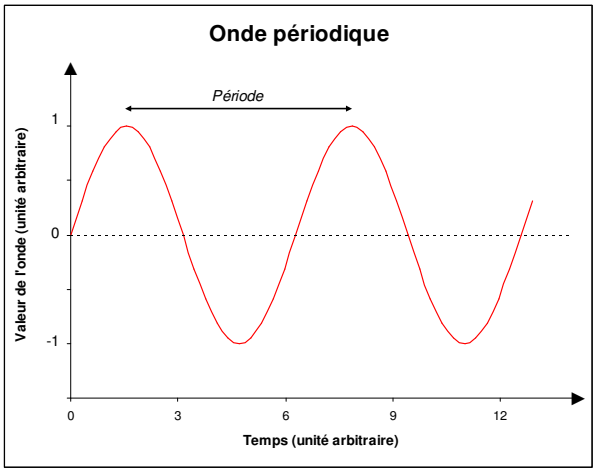
ONDE

Wave

Phénomène de propagation d'une **GRANDEUR** physique dont les variations en un point considéré et à un instant donné, dépendent des variations de la grandeur en tous les autres points du milieu de propagation. Ce phénomène de propagation s'accompagne d'un *transport d'***ÉNERGIE** *sans transport de* **MATIÈRE**. Deux grandes familles d'ondes peuvent être distinguées : les *ondes électromagnétiques* (appelées encore **RAYONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE**) qui peuvent se

propager en dehors de tout milieu matériel, et les *ondes matérielles* qui ne peuvent se transmettre que dans un milieu solide (vibrations, etc.), liquide (vagues, etc.) ou gazeux (sons, etc.).

Le schéma suivant illustre une onde périodique.



La caractérisation de ces ondes, qu'elles soient électromagnétiques ou matérielles, fait appel à des notions communes (*période*, *longueur d'onde, fréquence*) auxquelles s'ajoutent des grandeurs spécifiques à chaque famille.

La *période* T d'une onde peut être simplement définie comme la durée d'un cycle (écart de **TEMPS** entre deux valeurs identiques de l'onde périodique).

La *fréquence* f est l'inverse de la période : $f = 1/T$. Elle exprime le nombre de cycles d'une onde par unité de temps. Sa dimension est donc l'inverse d'un temps. La notion de fréquence étant très importante en physique, on lui a attribué une unité spéciale, le hertz (Hz) en souvenir du physicien allemand Heinrich Rudolf HERTZ (1857-1894) qui clarifia et étendit la théorie électromagnétique de la **LUMIÈRE** proposée par le physicien anglais James MAXWELL). Ainsi, par exemple, les battements du cœur ont une fréquence voisine de 1 Hz (un battement par seconde). L'électricité est distribuée en France sous la forme d'un courant alternatif de fréquence 50 Hz (soit 50 cycles par seconde). Le « LA » en musique vibre à 440 Hz. La fréquence du rouge dans le **SPECTRE** visible est de $5 \cdot 10^{14}$ Hz.

La *longueur d'onde* λ est le produit de la période T et de la vitesse v de l'onde. Dans le cas des ondes électromagnétiques, la vitesse v est le plus souvent égale à c, la *vitesse de la lumière*. On a la relation : $\lambda = c \cdot T$.

OZONE

Ozone

GAZ dont la **MOLÉCULE** se compose de trois **ATOMES** d'oxygène (O_3). Ce gaz très instable, doté d'une odeur très forte et irritante, très oxydant, possède les qualités de ses défauts. Ainsi, il présente de bonnes propriétés antiseptiques et bactéricides qui conduisent à l'utiliser pour désinfecter des fluides comme l'air ou l'eau. Cependant, il s'avère très toxique pour l'homme et dangereux pour de nombreux matériaux constitutifs des collections patrimoniales. Il affadit les teintures, attaque les matériaux photographiques et les métaux (sauf

l'or et le platine), endommage les documents graphiques, affaiblit le caoutchouc.

Tant qu'il demeure dans la *stratosphère* où il est produit par l'action du **RAYONNEMENT** solaire *ultraviolet* (UV) sur les molécules d'oxygène, il forme alors un écran protecteur pour les organismes vivants de la Terre contre les rayonnements UV de longueur d'onde inférieure à 290 nm, c'est-à-dire les plus nocifs. En revanche, dans l'**ATMOSPHÈRE**, il redevient nuisible. Il est alors le résultat d'une interaction avec le dioxyde d'azote NO_2 produit par la pollution automobile. Les UV de longueur d'onde supérieure à 290 nm qui n'ont pas été stoppés par la couche d'ozone stratosphérique, vont dissocier les molécules de dioxyde d'azote. Un atome d'oxygène libéré va se combiner à une molécule d'oxygène pour former de l'ozone.

L'ozone peut aussi résulter de fortes décharges électriques dans l'air. Ceci explique que certaines imprimantes laser soient de dangereux générateurs d'ozone.

Il est très efficacement adsorbé par les filtres à charbon actif (→ **FILTRATION**).

P

PÉRIODIQUE
Periodic

Se dit d'un **RÉGIME DYNAMIQUE** où les **CONDITIONS AUX LIMITES** imposées au **SYSTÈME** sont de nature cyclique (évolution sinusoïdale d'une **TEMPÉRATURE**, par exemple). Avec des phénomènes réels (l'évolution climatique, par exemple), cette périodicité peut être plus ou moins régulière.

PERMANENT
Steady state

Se dit d'un **RÉGIME** où les **CONDITIONS AUX LIMITES** imposées à un **SYSTÈME** demeurent constantes. Dans ce sens, synonyme de **STATIQUE**. S'oppose à **DYNAMIQUE**.

PERMÉABILITÉ
Permeability

Aptitude d'un milieu solide à se laisser traverser par un fluide sous l'effet d'un gradient de pression dudit fluide. Ce fluide n'est pas forcément un liquide. Le solide n'est pas forcément poreux. Ainsi, la notion de perméabilité d'un sol à l'eau est facile à appréhender. A contrario, la perméabilité du verre au gaz, pour être moins intuitive et surtout très faible, n'en est pas moins une réalité.

PESANTEUR
Gravity

Phénomène d'attraction entre deux ou plusieurs **SYSTÈMES** dotés d'une **MASSE**. En un lieu donné, on peut établir une relation de proportionnalité entre la masse m d'un corps et la **FORCE** $\vec{P}$ qu'il exerce sur son support :

$$\vec{P} = m \cdot \vec{g}.$$

Cette force particulière a été baptisée **POIDS**. La relation précédente fait intervenir une *grandeur vectorielle* $\vec{g}$ nommée *accélération de la pesanteur*

qui est fonction du lieu considéré. L'ensemble des vecteurs locaux de la pesanteur forme ce que l'on nomme le **CHAMP** de pesanteur. Par nature, il s'agit d'un champ sphérique. La norme du vecteur $\vec{g}$ s'exprime en m/s². Sa valeur moyenne au niveau de la mer est de 9,81 m/s².

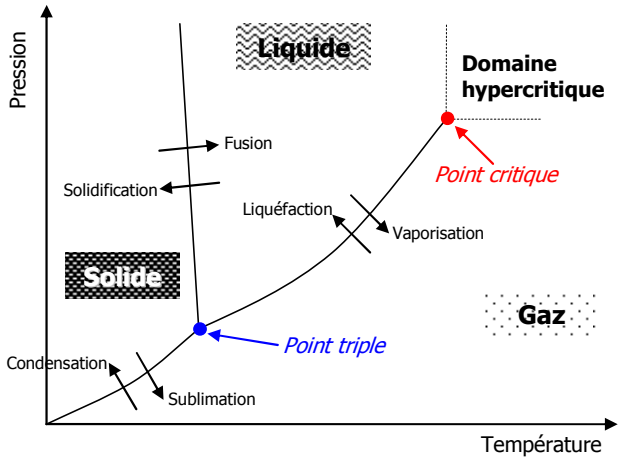
La détermination précise du champ de pesanteur terrestre permet de distinguer le champ de *gravité* proprement dit qui résulte de l'attraction qui s'exerce entre les corps (selon une loi célèbre formalisée par Isaac NEWTON), de quelques effets secondaires dus notamment à la rotation de la planète et à l'attraction des autres astres. La plupart du temps, le champ de pesanteur et le champ de gravité peuvent être confondus.

PHASE

Phase

Synonyme d'**ÉTAT** lorsque le substantif dénote une certaine organisation de la **MATIÈRE**. Ainsi on parle de phase solide, liquide ou gazeuse d'une substance. Peut également désigner des ensembles de particules matérielles dans des mélanges hétérogènes (cf. **COLLOÏDE** et **DISPERSION**).

Tous les corps purs peuvent exister sous les trois états solide, liquide et gazeuse en fonction de deux facteurs : la **PRESSION** et la **TEMPÉRATURE**. Pour chaque substance considérée, on peut tracer un *diagramme de phases* illustrant graphiquement les conditions d'existence des phases et de **CHANGEMENTS D'ÉTAT** en fonction de la pression et de la température.



Sur ce diagramme, nous avons reporté le nom conventionnel des changements d'état. Pour plus d'explication, se reporter aux entrées correspondantes du lexique.

PHYSIQUE

Physics

Ensemble des disciplines scientifiques visant à donner une description aussi précise que possible des phénomènes naturels en recherchant les lois fondamentales qui les sous-tendent à l'aide de méthodes expérimentales. La physique excelle à expliquer le *comment* des phénomènes laissant, le plus souvent, le *pourquoi* dans le champ de la métaphysique.

1. **Objet de la physique.** — La *physique* a pour objet l'étude des phénomènes que présentent les corps, en tant que ceux-ci n'éprouvent pas de changements dans leur composition.

La *chimie*, au contraire, traite particulièrement des phénomènes qui modifient plus ou moins profondément la nature des corps.

Extrait de A. GANOT, *Traité élémentaire de physique expérimentale et appliquée*, Paris, Chez l'Auteur-Éditeur, 1868, p. 1.

Pour des raisons historiques, mais aussi qui tiennent à la nécessaire division du travail, la physique est traditionnellement divisée en nombreuses disciplines telles que la mécanique, l'électricité, l'optique, la thermodynamique, etc. Mais l'un des grands acquis de la recherche du XX^e^ siècle et l'une des grandes victoires de la physique quantique, ont été de montrer que la *totalité* du monde matériel qui nous entoure pouvait être expliqué par le jeu (forcément complexe et pas toujours compris) de seulement quatre **FORCES FONDAMENTALES** : l'*interaction gravitationnelle*, l'*interaction électromagnétique*, l'*interaction faible* et l'*interaction forte* ! La **CHIMIE** toute entière ne repose que sur la seule interaction électromagnétique comme base conceptuelle de toutes ses théories…

Les processus physiques sont le plus souvent décrits par des relations entre des **GRANDEURS** mesurables représentées par des entités mathématiques telles que des *nombres*, des *vecteurs* ou des *fonctions*. L'effort des physiciens est de traduire ces relations sous forme d'équations, baptisées *lois physiques* et auxquelles on associe le plus souvent le nom du scientifique qui, le premier, les a établies.

Les mathématiques jouent un rôle essentiel d'outil au service de la physique. Cependant, elles ne doivent pas occulter la réalité des phénomènes naturels qu'elles ont pour seul devoir de représenter sous une forme aisément manipulable. Le formalisme mathématique et la rigueur qu'il requiert, peuvent devenir un obstacle à la compréhension pour qui n'a pas bénéficié de la formation nécessaire. C'est la raison pour laquelle le choix a été fait, pour ce lexique, de ne recourir que très marginalement aux notations mathématiques et de les limiter, le cas échéant, à un niveau élémentaire.

POIDS

N

Weight

Force exercée par une **MASSE** placée dans un **CHAMP** de **PESANTEUR**. Il existe entre la masse, le poids et l'*accélération de la pesanteur* une relation fondamentale :

$$\vec{P} = m \cdot \vec{g},$$

Balance à fléau traditionnelle.

dans laquelle $\vec{P}$ le poids (en N), m est la masse du corps considéré (en kg) et $\vec{g}$ l'accélération de la pesanteur (en m/s^2).

La notion de poids ne doit pas être confondue avec celle de masse. Bien qu'admise dans le langage courant, l'expression « cet objet *pèse* 1 kg » n'a pas de sens physique. Un objet dont la masse est d'un kilogramme pèse 9,81 newtons environ à la surface de notre planète mais seulement 1,63 newton sur la Lune et ... 0 newton dans l'espace !

À une distance suffisante de toute étoile ou planète, on peut

Elle permet de mesurer des masses en établissant une comparaison de forces à l'aide de masses de références appelées communément « poids » (Photo J. Poussin).

considérer que le champ de pesanteur est de valeur nulle. Par conséquent, une masse quelconque n'étant pas accélérée, n'exerce aucune force et, par voie de conséquence, ne *pèse* rien.

On nomme également poids, des masses de référence utilisées avec des balances à fléau telle que celle de l'illustration ci-contre.

POLYMÈRE

Polymer

MOLÉCULE résultant de l'association en chaîne de molécules organiques identiques (*monomère*). Le polymère se forme lors d'une réaction chimique appelée *polymérisation*. Les monomères sont le plus souvent des **GAZ** ou des **LIQUIDES** tandis que les polymères sont fréquemment des **SOLIDES**. Des polymères peuvent résulter de la combinaison de plusieurs monomères de nature différente. On les nomme alors *copolymères*. La chaîne macromoléculaire d'un polymère peut comporter plusieurs milliers, voire millions de monomères. L'organisation spatiale des chaînes correspond à des topologies très variées. On rencontre des architectures linéaires, ramifiées, en peigne, en étoile, en échelle, en réseaux divers, etc. Cette organisation correspond à des structures moléculaires diverses : amorphes, amorphes orientées, semi-cristallines, etc.

POROSITÉ

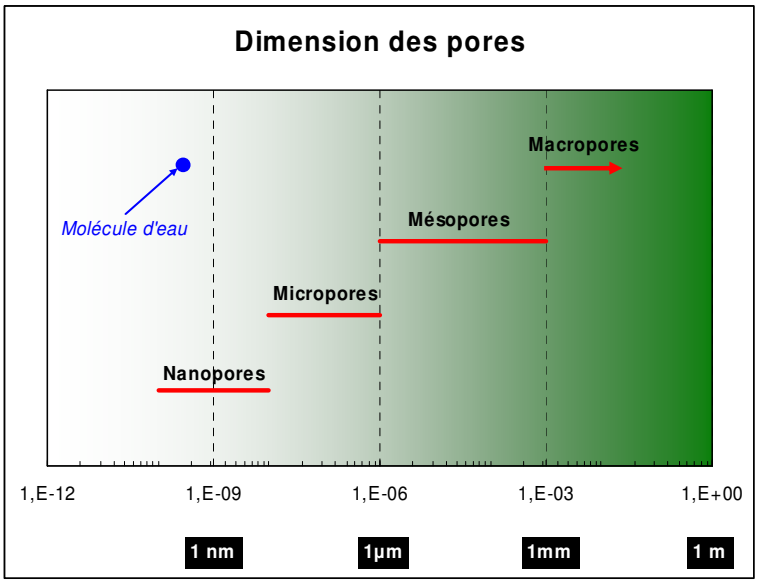
Porosity

Propriété de certains **MATÉRIAUX** de présenter une structure lacunaire. La porosité peut être *ouverte* (pores communicants) ou *fermée* (pores indépendants).

Dimension des pores :

- *Nanopores* : $r < 0{,}01$ µm (10 nm).
- *Micropores* : $0{,}01$ µm $< r < 1$ µm (1000 nm).
- *Mésopores* : 1 µm $< r < 1000$ µm (1 mm).
- *Macropores* : $r > 1$ mm.

Ces données sont illustrées par le graphe suivant :



La porosité peut être mesurée en laboratoire (*porométrie*). Une mesure de la porosité est donnée par l'évaluation de la *surface spécifique* (surface développée des pores) exprimée généralement en m^2/g. Un *charbon actif,* matériau très utilisé en *filtration chimique* de l'air présente une surface spécifique de l'ordre de 1000 m^2/g.

En supposant une **ADSORPTION** monocouche de molécules d'eau, un calcul rapide montre qu'un gramme de charbon actif peut adsorber théoriquement jusqu'à 30 % de sa masse.

Selon une publication récente (*Science*, 23 septembre 2005, vol. 309), une équipe française de l'Institut Lavoisier (CNRS/Université de Versailles) vient de battre un record mondial en proposant un nouveau matériau (le téréphtalate de chrome) dont les pores ont une dimension comprise entre 2,9 et 3,4 nanomètres et dont la surface spécifique est de 5 900 m^2/g ! La demande industrielle pour ce type de matériau étant très grande, ce record risque bien de ne pas durer très longtemps.

POTENTIEL HYDROGÈNE

pH

Mesure de l'*acidité* ou de la *basicité* d'une **SOLUTION**. En abrégé, le potentiel hydrogène est noté *pH*. Dans l'eau pure, en l'absence de tout **ACIDE** ou de toute **BASE** en solution, il se produit spontanément une ionisation selon les réactions suivantes :

$$H_2O \leftrightarrow OH^- + H^+,$$

$$H_2O + H^+ \leftrightarrow H_3O^+.$$

On observera que dans la première relation, l'eau joue le rôle d'un acide puisqu'elle est donneur de *protons*. Dans la seconde, elle joue le rôle d'une base. À 25 °C, l'équilibre acido-basique spontané de l'eau pure s'établit avec une concentration des ions H_3O^+ de $1 \cdot 10^{-7}$ mol/L. À l'évidence, la concentration des ions OH^- (dit *ions hydroxyles*) est identique.

C'est la concentration en ions H_3O^+ (notée $[H_3O^+]$) d'une solution qui est utilisée comme mesure de son acidité ou de sa basicité. Comme cette concentration peut varier dans des proportions considérables, la mesure est exprimée sur une échelle logarithmique selon la relation de définition :

$$pH \equiv -\log_{10} [H_3O^+].$$

Appliquée au cas de l'eau pure, la formule précédente donne le résultat suivant :

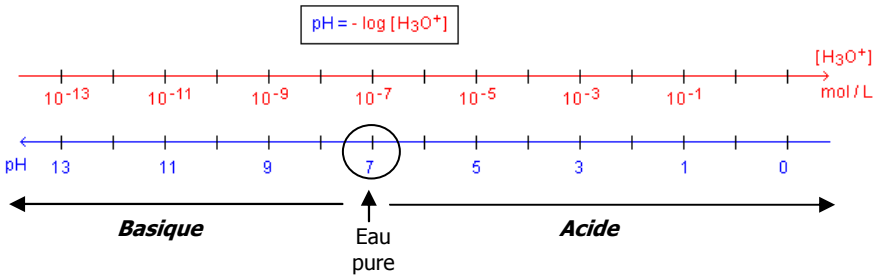
$$pH = -\log_{10} [1 \cdot 10^{-7}],$$

$$pH = 7.$$

La figure suivante (d'après A. Testanière) illustre la relation entre la concentration en ions H_3O^+ et le pH :

Petit rappel mathématique

Le logarithme de 1 est égal à 0. Tout nombre inférieur à 1 a un logarithme négatif. La concentration ionique s'exprime par un nombre toujours inférieur à un. Le logarithme est donc toujours négatif, d'où le signe moins dans l'équation, artifice mathématique permettant que le pH soit toujours un



Un pH égal à 7 caractérise donc une solution neutre du point de vue de son équilibre acido-basique. Des valeurs inférieures correspondent à des solutions acides (pH < 7), des valeurs supérieures, à des solutions basiques (pH > 7).

PRESSION

Pa

Pressure

Contrainte exercée sur une surface. Une **FORCE**, le **POIDS** d'un objet par exemple, appliquée sur une surface de dimension donnée, se traduit par une pression. Mathématiquement, cette **GRANDEUR** se calcule en faisant le rapport de l'intensité de la **FORCE** (exprimée en newton, symbole N) et de la surface concernée (exprimée en mètre carré, symbole m^2). L'unité de pression dans le **SYSTÈME INTERNATIONAL D'UNITÉS** est le *pascal* (symbole Pa). Une force de 1 N appliquée à une surface de 1 m^2 induit une pression de 1 Pa sur ladite surface. Un **GAZ** placé dans une enceinte exercera une pression sur les parois. Cette pression résulte des multiples chocs des **MOLÉCULES** induits par le mouvement thermique désordonné du gaz.

Est-il nécessaire de rappeler que le nom donné à l'unité de pression est celui de l'une des plus fulgurantes intelligences de l'histoire des sciences : Blaise PASCAL. Né en 1623 à Clermont, mort prématurément à Paris à l'âge de 39 ans, PASCAL fut un mathématicien d'une précocité ahurissante. En 1640, il publie un premier traité, *Essai sur les coniques*. Il n'a que 17 ans ! À 19 ans, il invente une machine à calculer révolutionnaire…

PRESSION ATMOSPHÉRIQUE

Pa

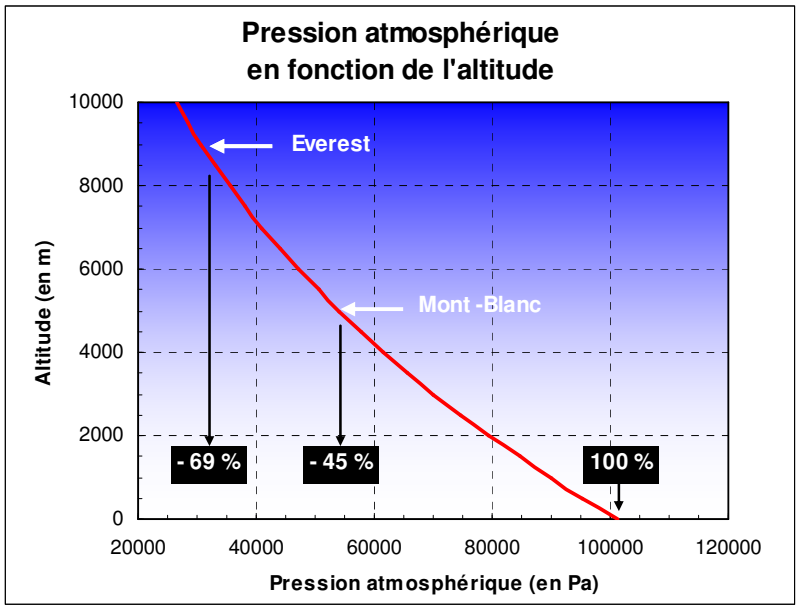
Atmospheric pressure

Contrainte exercée par l'**ATMOSPHÈRE**. Mélange de **GAZ**, l'atmosphère se caractérise, entre autres choses, par une **MASSE** et donc un **POIDS** sous l'effet de la **PESANTEUR** sans laquelle l'atmosphère ne pourrait pas se maintenir autour de notre planète. Ce poids de l'atmosphère appliqué à la surface terrestre se traduit par une **PRESSION**. La pression atmosphérique moyenne au niveau de la mer est de 101 325 Pa. Elle est souvent désignée par l'expression *pression atmosphérique normale*.

Il revient à Evangelista TORRICELLI (1608-1647), mathématicien et physicien, ancien élève des Jésuites, qui fut le secrétaire de l'illustre Galileo GALILEI, de comprendre que c'est la pression atmosphérique qui détermine la hauteur d'ascension d'un liquide dans un tube fermé à sa partie supérieure et dont l'orifice inférieur plonge dans un réservoir plein du même liquide. Ses dispositifs expérimentaux constituaient les premiers baromètres. Aujourd'hui encore, on utilise quotidiennement des *tubes de Torricelli* pour suivre l'évolution de la pression atmosphérique. Evangelista TORRICELLI meurt précocement à

Florence à l'âge de 39 ans.

Torricelli a vérifié que la forme et le diamètre du tube qu'il utilisait n'avait aucune influence sur la hauteur atteinte par le mercure (Doc. IMSS).



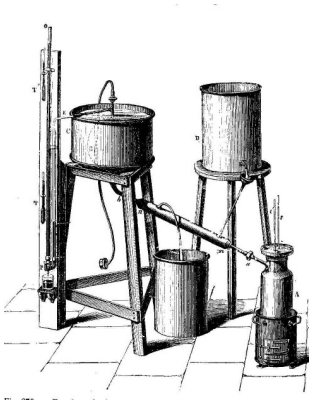
La pression atmosphérique décroît avec l'altitude comme le montre le graphe. Ainsi, à 5 000 m d'altitude, la pression atmosphérique n'est plus qu'environ la moitié de celle mesurée au niveau de la mer. Pour un même volume inspiré, l'être humain placé à cette altitude voit donc sa dose d'oxygène divisée par 2. Au sommet de l'Everest, la pression atmosphérique est sensiblement divisée par 3 !En un lieu donné, la pression atmosphérique varie dans le temps en fonction de l'état de l'atmosphère et notamment la **TEMPÉRATURE** de l'air, mais les fluctuations autour de la valeur moyenne ne dépassent guère quelques pour cent.

PRESSION DE VAPEUR SATURANTE

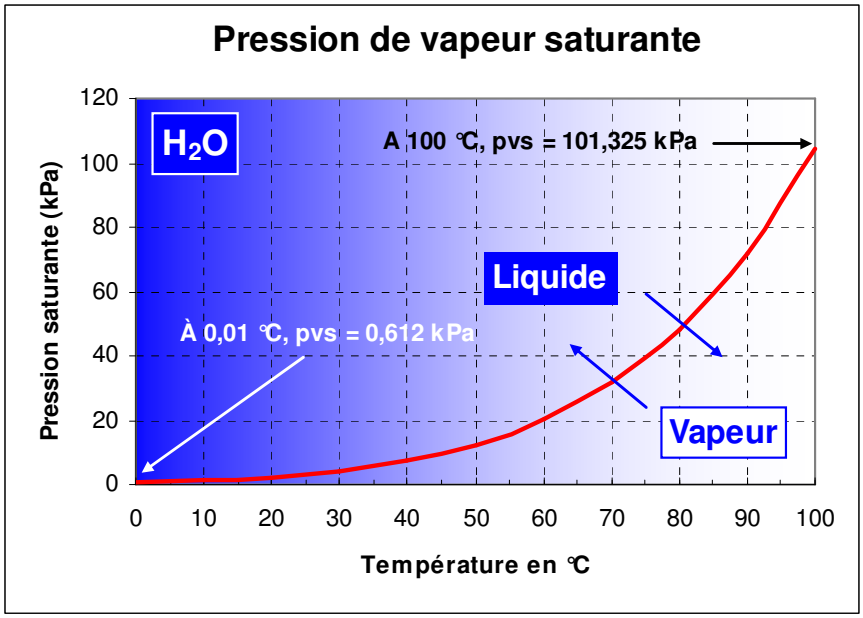
Pa

Saturation pressure

PRESSION d'**ÉQUILIBRE** d'une **VAPEUR** et de sa **PHASE** liquide pour une substance donnée. Cette pression saturante ne dépend que de la **TEMPÉRATURE**. Elle est la même que la mesure soit faite dans une enceinte ne contenant que la vapeur de la substance, ou en présence d'un autre gaz (l'air par exemple). La relation entre pression de vapeur saturante et température est déterminée expérimentalement. On procède point par point, la température étant maintenue constante à chaque étape de l'établissement de la relation $p_{vs} = f(\theta)$. La courbe donnant la pression de vapeur saturante en fonction de la température pour l'eau est donnée par le graphe suivant.



Doc. DRION & FERNET.



Pour l'eau, cette détermination expérimentale a été conduite avec une excellente précision dès le milieu du XIX^e^ siècle par un chimiste et physicien français, Henri REGNAULT (1810-1878). Son dispositif est dérivé du *tube de Torricelli* parfaitement identifiable sur la gauche de l'illustration ci-contre.

Il faut admirer la précision obtenue par Regnault avec un système qui a bien des allures clandestines d'alambic ! Ses mesures de la pression de vapeur saturante entre 0 et 100 °C présentent une erreur inférieure à 1 % par rapport aux valeurs communément admises aujourd'hui… On retiendra également que H. Regnault fut l'inventeur du **PSYCHROMÈTRE**.

PRESSION DYNAMIQUE

Pa

Dynamic pressure

Pression qui s'exerce dans la direction de l'écoulement d'un fluide. Elle est proportionnelle au carré de la vitesse du fluide. Elle se calcule avec la relation suivante :

$$p_d = \frac{1}{2}\varrho \cdot v^2,$$

dans laquelle v est la vitesse en m/s et ϱ la masse volumique en kg/m^3. Comme on pourra le vérifier, cette relation est formellement identique à celle qui permet d'évaluer l'**ÉNERGIE CINÉTIQUE** d'un corps mobile. En faisant l'*analyse dimensionnelle* des deux relations, on peut immédiatement voir que la pression est une grandeur correspondant à une énergie volumique : 1 Pa = 1 J/m^3.

La pression dynamique qu'exerce le vent sur une façade de bâtiment dépend donc du carré de la vitesse du vent. À 10 km/h, la pression exercée n'est que de 5 Pa. Si le vent atteint 100 km/h, la pression dynamique s'élève à 500 Pa.

PRESSION PARTIELLE

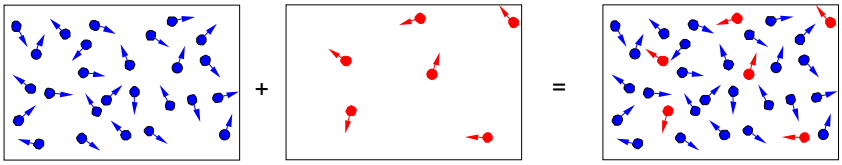
PRESSION qu'exercerait un composant d'un mélange gazeux s'il occupait *seul* le **VOLUME** considéré à la même **TEMPÉRATURE**. Tout se

Pa

Partial pressure

passe comme si chaque composant d'un mélange agissait pour son compte sans interférence avec les molécules des autres substances. C'est John DALTON (physicien anglais, 1766-1844) qui, le premier, a établi la loi qui stipule que, dans un mélange gazeux, la pression totale est égale à la somme des pressions partielles de chacun des composants. En toute rigueur, cette loi n'est vraie que si chaque composant est un **GAZ PARFAIT** et que le mélange peut être considéré lui aussi comme un gaz parfait. Dans l'atmosphère terrestre, le comportement des mélanges des gaz n'est pas exactement conforme à la loi de Dalton mais s'en rapproche de très près. Nous admettrons donc que la *loi de Dalton* est vraie. Elle peut s'illustrer de la façon suivante :

$p_t = p_1 + p_2$



Placé dans une enceinte telle que figurée sur le schéma précédent, le gaz « bleu » exerce la pression p_1 tandis que le gaz « rouge » impose la pression p_2. Placés ensemble dans la même enceinte, la **PRESSION TOTALE** mesurée p_t est égale à la somme $p_1 + p_2$.

Considérons le cas particulier de la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air atmosphérique. Sous nos climats, cette pression partielle ne dépasse que très rarement le seuil de 4 % de la pression totale (qui n'est autre que la **PRESSION ATMOSPHÉRIQUE)**.

PRESSION STATIQUE

Pa

Static pressure

PRESSION qui s'exerce dans toutes les directions d'un fluide. On dit aussi *pression isotrope*. Auteur de la première *théorie cinétique* des **GAZ**, Daniel BERNOULLI (1700-1782) a montré que dans un *écoulement laminaire* (non turbulent) d'un fluide incompressible, la somme des pressions statique et dynamique était constante. En d'autres termes, si, en un lieu quelconque de l'écoulement, la vitesse augmente, il s'en suit que la **PRESSION DYNAMIQUE** augmente au détriment de la pression statique. Il se produit donc localement une dépression. Ce phénomène est souvent appelé *effet Venturi*, du nom du physicien italien Giovanni Battista VENTURI, qui, le premier, l'a étudié en détail. Il peut également être utilisé pour mesurer des vitesses ou réaliser des dispositifs de pompage. C'est également ce phénomène qui permet d'expliquer le phénomène de sustentation des ailes d'un avion. Mais ce phénomène peut aussi avoir de graves répercutions sur l'intégrité d'un bâtiment quand le vent est la cause de l'écoulement fluide.

PRESSION TOTALE

Pa

Total pressure

Somme des pressions partielles des constituants d'un mélange de gaz parfaits (*loi de Dalton*). Pratiquement, on peut considérer que la **PRESSION ATMOSPHÉRIQUE** est la somme de la **PRESSION PARTIELLE** de la vapeur d'eau et de celle de l'air sec (c'est-à-dire de la pression partielle de l'azote, plus celle de l'oxygène, plus celle qu'exercent tous les autres gaz présents dans l'air atmosphérique à

l'état de traces).

Lorsque le concept est relatif à un écoulement fluide, il désigne la somme de la **PRESSION STATIQUE** et de la **PRESSION DYNAMIQUE**.

PSYCHROMÈTRE

Psychrometer

À droite, le thermomètre à bulbe sec. À droite, le thermomètre à bulbe humide. Au centre, la réserve d'eau. (Doc. J. Jamin).

Appareil de mesure permettant de définir l'état hydrique de l'air (**HUMIDITÉ RELATIVE** ou **HUMIDITÉ ABSOLUE**) à partir d'une mesure de la **TEMPÉRATURE SÈCHE** (notée θ_s) et de la **TEMPÉRATURE HUMIDE** (notée θ_h). Plus le mélange constitué d'*air sec* et de **VAPEUR** d'eau est éloigné de la **SATURATION**, plus l'écart entre les valeurs mesurées de ces deux températures est important. La détermination de l'humidité relative ou de l'humidité absolue est faite par calcul ou, plus simplement, à l'aide d'un graphe spécial fourni par le constructeur du psychromètre ou au moyen d'un diagramme de l'air humide (**DIAGRAMME PSYCHROMÉTRIQUE**) adapté à l'altitude du lieu.

Il existe différentes sortes de psychromètres dont l'archétype est celui de l'illustration ci-contre. On améliore considérablement la qualité de la mesure en faisant en sorte que l'air circule rapidement autour des deux **THERMOMÈTRES**. Les plus commodes sont des appareils comportant deux capteurs de température enfermés dans un corps ventilé, l'un étant maintenu humide. Les deux capteurs sont reliés à un boîtier électronique assurant l'affichage des mesures et le calcul automatique des valeurs de l'hygrométrie de l'air en fonction de la **PRESSION ATMOSPHÉRIQUE**.

PUISSANCE

W

Power

Quantité de **TRAVAIL** effectué par unité de **TEMPS**. En prenant en compte l'équivalence entre **ÉNERGIE** et travail, une autre définition peut être proposée : « énergie fournie par unité de temps ». La première définition est utile en mécanique. La seconde est plus adaptée à l'énergétique et à l'électricité.

L'unité de puissance découle directement de sa définition : c'est le joule par seconde. On lui a donné le nom de watt en souvenir de James WATT (1736-1819), l'ingénieur écossais qui a considérablement perfectionné les machines à vapeur après avoir longtemps fabriqué des instruments scientifiques. En reconnaissance de ces formidables inventions, entre autres honneurs, il fut nommé en France membre associé de l'Académie des Sciences.

Q

QUANTITÉ DE MATIÈRE

mol

Mole

GRANDEUR permettant le dénombrement des entités élémentaires (**ATOMES**, **MOLÉCULES**, **IONS**, etc.) constituant le **SYSTÈME** étudié. La quantité de matière s'exprime en mole, l'une des sept **UNITÉS** fondamentales du *système SI* (symbole : mol). Dans une mole, il existe par définition N_A entités élémentaires. N_A est le *nombre (*ou *constante) d'Avogadro* et vaut $6{,}02214 \cdot 10^{23}$ mol^{-1}. Cette valeur correspond au nombre d'atomes contenus dans 12 g de l'*isotope* 12 du carbone.

Supposons qu'un échantillon d'une substance donnée contienne N entités élémentaires, la quantité de matière n considérée (en mole) sera donc par définition :

$$n = \frac{N}{N_A}.$$

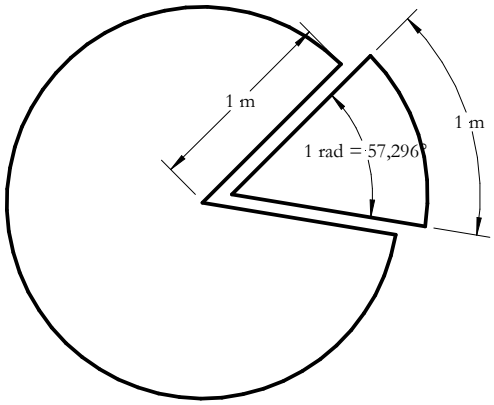
R

RADIAN

rad

Radian

Unité d'*angle* (sans dimension) dans le *Système SI*. Un angle d'un radian est la mesure d'un secteur angulaire plan formé entre deux rayons d'un cercle qui intercepte un arc de longueur 1 m sur une circonférence de rayon 1 m. La longueur d'une circonférence est égale à $2\pi r$ où r est le rayon. Il s'ensuit qu'un angle a une valeur maximale égale à 2π radians (360°). On obtient facilement la conversion 1 rad = 57,296°.



RADIOACTIVITÉ

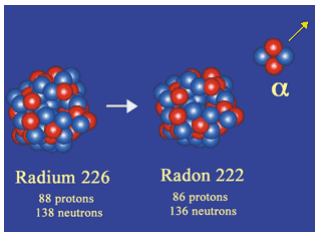
Radioactivity

Émission spontanée de **MATIÈRE** et/ou **D'ÉNERGIE** par des noyaux d'**ATOMES** instables au moment de leur désintégration. Encore dénommée *décroissance radioactive*. De nombreux atomes stables possèdent des *isotopes* qui, eux, ne le sont pas. Spontanément, ils se désintègrent pour tendre vers une architecture plus pérenne de leur noyau. Les corps responsables de cette radioactivité sont baptisés *radionucléides* ou encore *radioéléments* .

Les rayonnements émis lors de ces désintégrations spontanées sont de trois sortes : les rayonnements alpha (α), bêta (β) et gamma (γ). Le tableau ci-après résume leurs caractéristiques principales. Il permet de constater que plus la particule associée au rayonnement est petite, plus pénétrante est la radiation.

Type de rayonnement	Particule associée	Masse [kg]	Pouvoir de pénétration
α	Noyau d'hélium	$6{,}7 \cdot 10^{-27}$	Très faible
β	Électron	$9{,}1 \cdot 10^{-31}$	Moyen
γ	Photon	0	Très élevé

On observera que le pouvoir pénétrant des trois types de rayonnement



Exemple de désintégration α (Doc. IN2P3).

est, curieusement, inversement proportionnel à la **MASSE** des particules associées. Le plus pénétrant de tous est le rayonnement gamma dont la particule associée, le *photon*, est de masse nulle ! À noter également l'écart relatif de masse entre l'*électron* et le noyau d'hélium : le rapport est de un à plus de 7 000 !

Dans cette définition de la radioactivité, nous nous sommes conformés à l'usage et avons employé l'expression « rayonnement » pour évoquer les produits de désintégration. De fait, le mot est utilisé dans un sens impropre puisqu'il englobe un « vrai » rayonnement, le rayonnement γ et des émissions particulaires α et β qui, à proprement parler, ne peuvent être confondues avec des rayonnements, c'est-à-dire des *ondes électromagnétiques*.

Il importe de souligner que le phénomène de radioactivité est un processus à caractère statistique. En d'autres termes, si nous considérons un atome particulier d'un ensemble d'atomes identiques susceptibles de se désintégrer, il est impossible de savoir si cet atome sera le prochain à transmuter – c'est-à-dire à subir la décroissance radioactive – ou si le processus touchera son voisin ou n'importe quel autre atome de l'ensemble considéré. C'est la raison pour laquelle, l'étude de la radioactivité introduit une grandeur λ appelée *constante de désintégration* qui se définit comme la probabilité de désintégration d'un radionucléide par unité de temps. Sa dimension est l'inverse d'un temps. L'unité est donc l'inverse d'une seconde. Il est remarquable d'observer que cette probabilité, qui est une caractéristique propre du radionucléide considéré, est indépendante du **TEMPS** et de l'**ESPACE**. L'inverse de cette grandeur, qui s'exprime donc en secondes, est nommé *vie moyenne* d'un radionucléide. Cette nouvelle grandeur est notée τ. On a donc la relation très simple : $\tau = 1/\lambda$. La vie moyenne d'un radionucléide est excessivement variable d'un radionucléide à l'autre mais parfaitement constante pour un radionucléide donné.

Processus statistique donc, la radioactivité respecte une loi exponentielle qui permet d'établir une relation simple entre la durée de vie moyenne d'un radionucléide et la durée nécessaire pour que le nombre de noyaux radioactifs dans un fragment de matière diminue de moitié. Cette durée, exprimée en secondes bien sûr, est nommée *période radioactive* et est notée $T_{½}$. Cette relation s'écrit : $T_{½} = \tau \cdot \ln 2$. Dans cette expression « ln 2 » désigne le logarithme népérien de 2. Comme ln 2 vaut 0,693, la relation précédente se simplifie en $T_{½} = 0{,}7\ \tau$. Autrement dit, lorsque qu'on connaît la vie moyenne d'un radionucléide, il est aisé de déterminer la période radioactive d'une substance qui contient de tels noyaux. Et inversement.

Voici quelques exemples de périodes radioactives relatives à trois radionucléides :

- ^{239}U..... $7{,}2 \cdot 10^{8}$ ans
- ^{14}C ..... 5 730 ans
- ^{12}N..... $1{,}3 \cdot 10^{-2}$ s

La grande constance de la vie moyenne d'un radionucléide a permis

d'élaborer des techniques de datation des matériaux anciens. La plus connue est celle fondée sur le carbone 14 (^{14}C).

Lorsqu'on veut caractériser la radioactivité d'un milieu donné en prenant en compte l'ensemble des désintégrations des radionucléides présents dans ce milieu, on utilise la notion d'*activité nucléaire*. Elle se mesure en becquerel (du nom d'Antoine Henri BECQUEREL (1852-1908), le découvreur de la radioactivité). Cette unité correspond à une désintégration par seconde (symbole : Bq). La plupart du temps, cette grandeur ne peut être que mesurée en plaçant dans le milieu considéré des appareils capables de détecter les désintégrations qui se produisent.

Il serait fastidieux de citer tous les scientifiques qui ont apporté leur contribution à la compréhension de la radioactivité. On ne peut cependant oublier les précurseurs. Outre Henri BECQUEREL déjà cité, rappelons les noms de Pierre CURIE (1859-1906) et de son épouse Marie Sklodowska CURIE (1867-1934), et aussi celui d'Ernest RUTHERFORD (1871-1937), le père de la physique nucléaire.

Du point de vue de la conservation, la radioactivité ne pose guère de problème dans les édifices abritant des collections patrimoniales. Notons cependant qu'on a découvert que des fossiles de vertébrés pouvaient receler des taux importants de radium (^{226}Ra). Certains objets ou documents, notamment dans les collections scientifiques, peuvent également être radioactifs. Hormis ces rares cas, le principal risque provient du *radon* et ce risque concerne le personnel des établissements patrimoniaux ! Le radon (^{222}Rn, période de 3,82 jours) est un gaz radioactif naturel dont la source principale est le sol lui-même. Sa désintégration produit une particule α. Le radon est un descendant direct du radium, lui même provenant du thorium et, plus en amont, de l'uranium (^{238}U). Dans les espaces à faible renouvellement d'air (réserves, caves, grottes), la concentration en radon peut atteindre des niveaux très importants et dépasser les seuils de dangerosité sanitaire. Le seuil d'activité nucléaire jugé alarmant est de 400 Bq/m^3.

RAPPORT DE MÉLANGE

kg_{eau}/kg_{as}

Humidity (or mixing) ratio

Rapport entre la **MASSE** de **VAPEUR** d'eau contenue dans une certaine quantité d'**AIR HUMIDE** et la masse d'*air sec* avec laquelle elle est en mélange. Le choix de rapporter la masse d'eau à la masse d'air sec contenue dans le mélange vise à faciliter les calculs. En effet, quelles que soient les transformations subies par une certaine quantité d'air humide (chauffage, rafraîchissement, humidification, déshumidification), la quantité d'air sec impliquée dans le mélange ne change jamais au contraire de la quantité de vapeur d'eau. Exprimer les **GRANDEURS** caractéristiques de l'air humide par rapport à la quantité d'air sec facilite donc grandement les raisonnements et, accessoirement, les calculs.

Soit par exemple, un certain **VOLUME** d'air humide présentant une masse totale de 2 kg. Supposons que ce mélange contienne une masse de vapeur d'eau égale à 20 g. La masse d'air sec est donc de 1,98 kg. Par définition, le rapport de mélange est égal à 0,02/1,98 soit 0,0101 kg_{eau}/kg_{as}. En toute rigueur, étant un rapport de deux masses, le

rapport de mélange n'a pas de **DIMENSION**. L'unité conventionnelle utilisée, le kilogramme d'eau par kilogramme d'air sec (noté kg_{eau}/kg_{as}) n'a d'autre but que de rappeler comment est évalué ce ratio caractérisant l'état hydrique du mélange.

Le rapport de mélange est parfois appelé **HUMIDITÉ ABSOLUE** par certains auteurs. Pourquoi pas ! Pour notre part, nous pensons utile de distinguer les notions d'humidité absolue et de rapport de mélange. Quoi qu'il en soit, pour éviter toute confusion, il suffit de vérifier les unités utilisées dans l'expression des grandeurs considérées. D'où l'importance de ne jamais omettre de préciser l'unité attachée à une valeur numérique.

RAYONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Radiation

ONDE constituée d'un **CHAMP** électrique et d'un champ magnétique couplés. Se caractérise par une *longueur d'onde* (ou une *fréquence)*. À chaque onde, on peut associer une particule, un *photon*. Selon les circonstances, on s'intéressera davantage à l'aspect ondulatoire du rayonnement ou à son aspect corpusculaire. C'est le physicien français Louis de BROGLIE (1892-1987) qui osa le premier, en 1924, parler de la dualité onde-corpusculaire au grand dam de son jury de thèse qui, du coup, ne lui accorda pas les félicitations ! Quelques années plus tard, en 1929, il reçut le prix Nobel pour cette découverte théorique que toutes les expériences ultérieures vérifièrent.

Max Planck (DR).

Quelques années plus tôt, Max PLANCK avait, lui aussi, fait œuvre de génial pionnier en proposant l'une des plus belles idées scientifiques du XX^e^ siècle. Le physicien allemand (prix Nobel en 1918) comprit que si la matière est discontinue, les forces le sont aussi. On devait donc les « quantifier », autrement dit faire intervenir une constante équivalente à un quantum minimal d'action. Baptisée *constante de Planck* et notée *h*, ce quantum minimal vaut $6{,}62607 \cdot 10^{-34}$ J · s. Sa **DIMENSION** est le produit d'une **ÉNERGIE** et d'un **TEMPS**.

Albert EINSTEIN fut l'un des premiers à entrevoir l'aspect révolutionnaire de cette découverte. Appliquant le principe de quantification au rayonnement électromagnétique, il proposa cette très belle équation reliant l'énergie et la *fréquence* d'une onde :

$$E = h \cdot \nu,$$

qui indique que *E,* l'énergie associée à une onde (exprimée en joule) est le produit de la constante de Planck et de ν la fréquence de l'onde dont la dimension est l'inverse d'un temps.

On sait par ailleurs qu'il existe une relation fondamentale entre la longueur d'onde, la fréquence et la vitesse d'une onde :

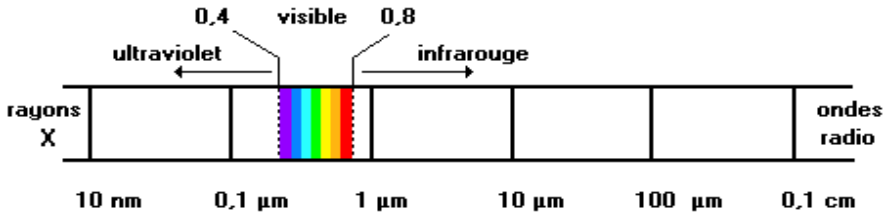
$$c = \lambda \cdot \nu,$$

dans laquelle *c* est la vitesse de l'onde (dans le **VIDE,** cette vitesse est celle de la **LUMIÈRE** soit 299 792 458 m/s) et λ la longueur d'onde.

En combinant les deux équations précédentes, on obtient :

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda}.$$

Cette dernière relation montre que l'énergie associée à un photon d'une onde est inversement proportionnelle à sa longueur d'onde. C'est la raison pour laquelle, le *rayonnement ultraviolet* ($\lambda_{UV} = 2 \cdot 10^{-7}$ m pour l'UV court) est plus dangereux pour les collections patrimoniales que l'*infrarouge* ($\lambda_{IR} = 1 \cdot 10^{-6}$ m pour l'IR proche). Le *rayonnement visible* est situé entre l'ultraviolet et l'infrarouge. Sa plage spectrale est comprise entre 380 et 780 nm (0,38 et 0,78 µm).



Échelle logarithmique de la longueur d'onde des rayonnements électromagnétiques (DR).

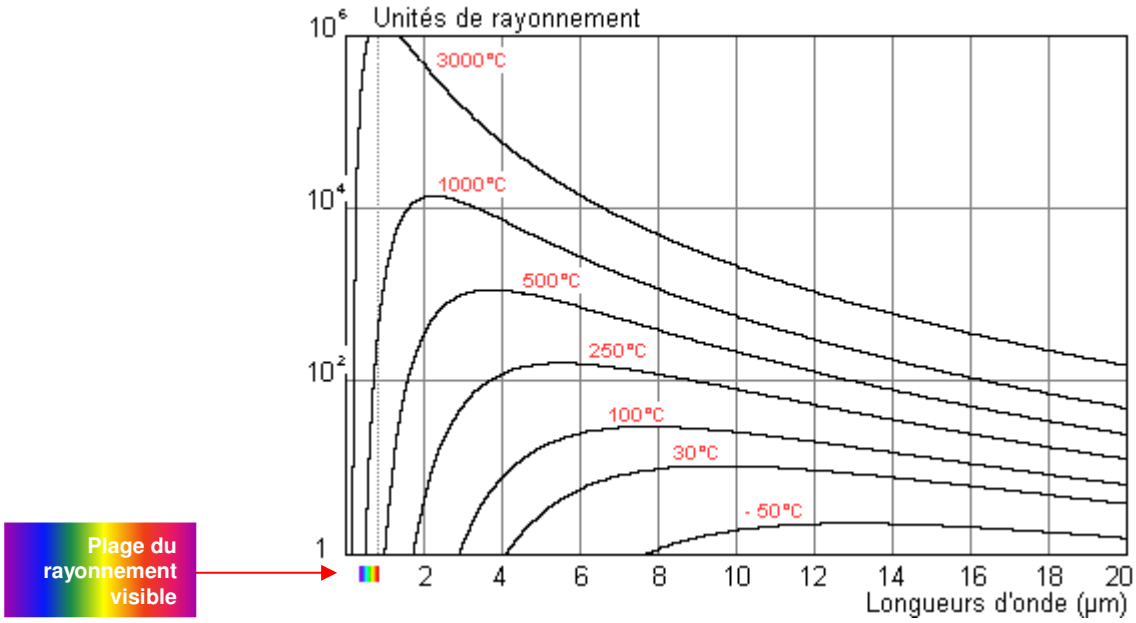
RAYONNEMENT THERMIQUE

Thermal radiation

RAYONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE dont les effets sont essentiellement thermiques. Chaque corps dont la **TEMPÉRATURE** est supérieure au zéro absolu, est le siège d'une agitation moléculaire. Celle-ci engendre une émission électromagnétique, un rayonnement, dont les caractéristiques (notamment la *longueur d'onde* λ) sont fonctions de la température. Lorsque ce rayonnement est reçu par une surface opaque pour la longueur d'onde correspondante, l'**ÉNERGIE** transportée est partiellement absorbée par la surface. La fraction absorbée est transformée en agitation moléculaire. Il y aura donc élévation de température du corps récepteur.

Le rayonnement émis par un corps est *polychromatique*. Étymologiquement, cela signifie que le rayonnement émet plusieurs « couleurs », en l'occurrence, il s'agit de plusieurs longueurs d'onde formant un **SPECTRE** caractéristique. À la fin du siècle dernier, le physicien allemand Wilhelm WIEN (prix Nobel en 1911) a découvert un fait capital : la longueur d'onde du maximum d'émission d'un rayonnement était d'autant plus faible que la température du corps émetteur était élevée. Ainsi, le Soleil dont le rayonnement correspond à un corps porté à 6 000 K présente un « pic » d'émission vers une longueur d'onde de 0,5 µm. Cette longueur d'onde est comprise dans la plage du spectre du rayonnement visible. Un **SOLIDE** dont la température est de 20 °C rayonne lui aussi, mais la longueur d'onde maximale du spectre émis est de 10 µm. Cette longueur d'onde correspond à la plage de l'*infrarouge*, non perceptible par l'œil humain.

Le graphe suivant montre la relation entre la température d'un corps et le spectre du rayonnement électromagnétique qu'il émet. Ce graphe illustre parfaitement la *loi de Wien* sur le déplacement du maximum du spectre rayonné en fonction de la température. Une substance dont la température est de – 50 °C émet un spectre électromagnétique dont le maximum se situe vers 13 µm. On observera que le rayonnement thermique émis à une longueur d'onde donnée est d'autant plus important que la température du corps émetteur est élevée.



On observera que le rayonnement thermique émis à une longueur d'onde donnée est d'autant plus important que la température du corps émetteur est élevée.

C'est la *loi de Wien* qui permet d'expliquer l'*effet de serre*. Comme chacun sait, le verre est transparent vis-à-vis du rayonnement visible (spectre radiatif compris entre 0,4 et 0,8 µm) et d'une petite fraction du spectre infrarouge. Ce dernier est compris, grosso modo, entre 0,8 et 300 µm. Certains auteurs bornent le spectre infrarouge à 100 µm, d'autres à 1000 µm. On distingue généralement deux sous-domaines, le proche infrarouge (0,8 µm < λ < 25 µm) et l'infrarouge lointain (25 µm < λ < 300 µm). La « fenêtre » de transparence du verre « s'ouvre » à 0,3 µm et « se ferme » entre 0,7 et 3 µm selon la composition du verre (et notamment la présence plus ou moins grande d'oxyde de fer Fe_2O_3). Aussi, lorsque le rayonnement solaire a pénétré dans un local et échauffé les objets et les parois, le rayonnement infrarouge du local dont la longueur d'onde est voisine de 10 µm, ne peut ressortir directement. Tout se passe comme si le rayonnement solaire avait été piégé par le local avec la complicité du verre et de sa propriété de transparence sélective.

L'illustration qui suit montre l'utilisation possible du rayonnement infrarouge : en détectant de légères différences de températures de surfaces, il devient possible de connaître la composition d'une paroi opaque. En effet, si la paroi est constituée de **MATÉRIAUX** hétérogènes, le transfert d'énergie à travers celle-ci induit des écarts de la température superficielle, écarts faibles mais mesurables. L'illustration correspond à un fragment de la voussure d'un plafond supportant une peinture. On distingue parfaitement les membrures en bois qui supportent la couche de plâtre peint ainsi que des défauts d'**ISOLATION** thermique de ce plafond. Les taches rouges d'allure horizontale correspondent à des tubes fluorescents disposés sur une corniche.

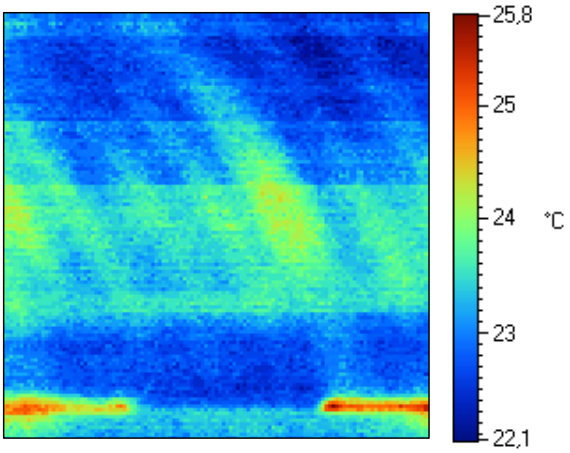


Image infrarouge en fausses couleurs d'une voussure peinte montrant les variations des températures de surface.

RÉACTION CHIMIQUE

Chemical reaction

Processus de transformation de la **MATIÈRE** entraînant une modification des substances originelles. Si l'on dissout du sel dans de l'eau, une transformation de la matière se produit mais elle est de nature physique. **L'ÉVAPORATION** de l'eau permet de retrouver le sel d'origine. Il n'y a pas eu de réaction. En revanche, si un morceau de fer est plongé dans de l'eau, il est progressivement transformé en une autre substance, un oxyde de fer dont les propriétés sont totalement différentes. La transformation est cette fois-ci de nature chimique. Elle peut être appelée « réaction ». La **CHIMIE** est l'étude des réactions qui se produisent entre substances constituées d'**ÉLÉMENTS** différents.

RÉGIME

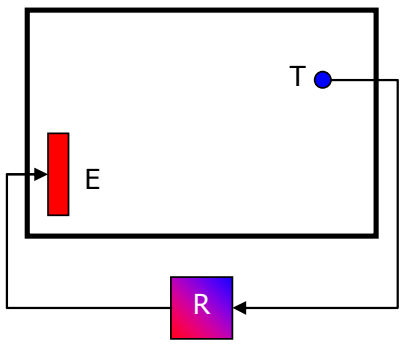
State

Ensemble des conditions physiques imposées aux limites d'un système. Si les conditions sont maintenues à des valeurs constantes, on dit que le **SYSTÈME** est soumis à un **RÉGIME PERMANENT** ou encore **STATIQUE**. Par opposition à un régime statique, on parle de régime **DYNAMIQUE**.

RÉGULATION

Control

Ensemble des opérations permettant d'ajuster le fonctionnement d'un **SYSTÈME** lorsque les **CONDITIONS AUX LIMITES** sont modifiées. Prenons un exemple simple. Soit à maintenir constante la **TEMPÉRATURE** dans un local donné. La température du local constitue la **GRANDEUR** à régler. La situation est illustrée par le schéma suivant :



L'ensemble des opérations de régulation va consister à mesurer la

température (T), transmettre l'information à un régulateur (R) auquel on a préalablement indiqué la température à maintenir dans le local (*température de consigne*). Le régulateur va réaliser une comparaison entre la valeur mesurée et la valeur de consigne. Si la valeur mesurée est inférieure, le régulateur va commander à l'émetteur de chaleur (E) de fournir de l'énergie au local. Lorsque la température de consigne sera atteinte, il commandera l'arrêt du chauffage. Et ainsi de suite.

L'exemple décrit est d'une extrême simplicité mais il reproduit les principes fondamentaux de toute régulation : mesure de la grandeur à contrôler, comparaison, décision, action, contrôle. De ce qui précède, il est aisé de comprendre que l'idée même de régulation suppose que la grandeur contrôlée subisse des variations puisque c'est la détection de ces variations qui va induire une action déclenchée par le régulateur. Dans l'exemple traité, la température intérieure ne peut demeurer constante à cause des variations extérieures du **CLIMAT** ou des perturbations intérieures. Une régulation est donc un dispositif qui tente de maintenir l'**ÉQUILIBRE** d'un système qui, sous l'effet des variations des sollicitations qu'il supporte, ne peut maintenir des valeurs caractéristiques constantes.

Les dispositifs de régulation utilisés aujourd'hui font appel aux techniques de l'électronique et de l'informatique.

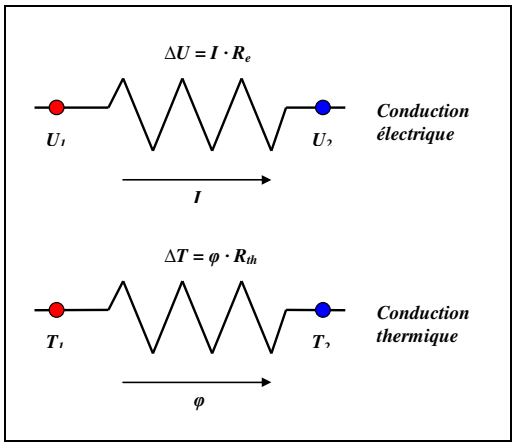
S

SATURATION
Saturation

Seuil au delà duquel il n'est plus possible d'accroître la quantité de **VAPEUR** présente dans un certain **VOLUME**. Ce seuil est défini par une limite de la **PRESSION** de vapeur qui peut régner dans ce volume. Pour une substance donnée, cette pression limite, appelée **PRESSION DE VAPEUR SATURANTE**, ne dépend que de la **TEMPÉRATURE**.

SIMULATION
Simulation

Technique permettant d'étudier le comportement d'un **SYSTÈME** physique plus ou moins complexe. Le système physique étudié doit être décrit par un **MODÈLE** approprié. La simulation peut faire appel à des techniques analogiques ou numériques. Dans les calculateurs analogiques, le modèle physique étudié est représenté par assemblages de résistances électriques, de condensateurs et de sources de courants dont le réseau est considéré comme *analogue* au modèle physique. Les résultats du calcul analogique sont obtenus par la mesure du courant ou des différences de potentiels aux bornes du réseau analogique créé. Les calculateurs analogiques ont été progressivement remplacés par les calculateurs numériques (ordinateurs) plus rapides et surtout plus souples. Cependant, le raisonnement analogique appliqué à l'analyse d'un système conserve toutes ses vertus heuristiques.



Le schéma précédent montre la similarité formelle des relations exprimant d'une part la chute de tension électrique en fonction de la résistance électrique et du courant qui traverse la résistance et, d'autre part, la chute de température en fonction de la résistance thermique et du flux thermique traversant cette résistance.

SOL

Sol

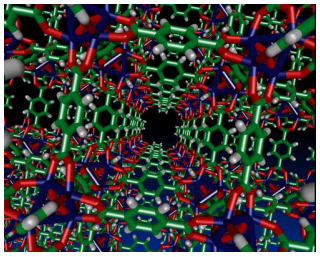
SYSTÈME formé d'une **PHASE** dispersée de particules solides ou liquides dans une phase continue liquide ou gazeuse. Si la phase continue est gazeuse, on parle d'**AÉROSOL**. Si elle est liquide, on parle de **DISPERSION** colloïdale (→ **COLLOÏDE**).

Ne pas confondre ce terme avec son parfait homonyme : « sol » qui désigne la couche superficielle de la croûte terrestre. L'origine étymologique des deux termes est fort différente. Le premier dérive du mot « solution ». Le second provient du latin *solum*.

SOLIDE

Solid

ÉTAT fondamental de la **MATIÈRE** correspondant au plus grand niveau d'organisation par comparaison avec les **LIQUIDES** et les **GAZ**. Dans un solide au repos, la position relative des **MOLÉCULES** constituant la substance est, en moyenne, fixe bien que ce réseau supporte une agitation moléculaire au même titre, mais à un moindre degré, que les liquides et les gaz. L'état solide se caractérise donc par une certaine rigidité.



Structure d'un cristal métallique complexe (DR).

À l'état de solide, de nombreuses substances adoptent une structure de *cristal* dans laquelle les atomes sont organisés selon un réseau parfaitement régulier et ordonné. C'est le cas notamment des métaux. On constate que la plupart des matériaux cristallins présentent des caractéristiques physiques *anisotropes* : leurs propriétés varient selon la direction selon laquelle elle est observée.

D'autres substances telles que le verre ou la plupart des polymères se caractérisent par un arrangement moléculaire désordonné. On les désigne par l'appellation de solides *amorphes*. La grande majorité de ces solides sont *isotropes* : leurs propriétés ne dépendent pas de la direction selon laquelle elle est mesurée.

Il arrive cependant que des matériaux complexes adoptent une structure macroscopique qui contredit les observations précédentes.

Un bon exemple en est le bois. Composé de polymères, il devrait être isotrope. Ce n'est pas du tout le cas. Sa structure cellulaire orientée présente des propriétés thermo-mécaniques très anisotropiques.

SOLIDIFICATION
Freezing

Phénomène de **CHANGEMENT D'ÉTAT** d'une substance passant de l'état liquide à l'état solide. On dit également *congélation*. Cette transformation est un processus *exothermique* qui restitue la **CHALEUR LATENTE** emmagasinée par la substance lorsqu'elle est passée de l'état solide à l'état liquide (**FUSION**).

SOLUTÉ
Solute

Se dit d'une substance dissoute dans un **SOLVANT** pour former une **SOLUTION**.

SOLUTION
Solution

Substance liquide formée d'au moins deux corps chimiques mêlés au niveau moléculaire : le **SOLVANT** et le ou les **SOLUTÉS** dissous dans le solvant. Si le soluté n'est pas totalement dissous mais subsiste sous forme d'agrégats moléculaires, on parlera de **DISPERSION**, de suspension ou de **COLLOÏDE**.

La *concentration* d'une solution est le ratio de la masse de soluté par unité de volume de solution. Elle s'exprime le plus souvent en g/L.

La *molarité* est la **QUANTITÉ DE MATIÈRE** de soluté par unité de volume de solution. Elle s'exprime en mol/L.

La *molalité* est la quantité de matière de soluté par unité de masse du solvant. Elle s'exprime en mol/kg. La molalité est indépendante de la température de la solution contrairement à la molarité dont la valeur est affectée par les variations de volume de la solution sous l'effet des changements de température.

La *solubilité* est définie comme le rapport de la masse du soluté sur la masse de la solution (masse du soluté plus masse du solvant). Elle peut s'exprimer en pour cent.

Si l'on fait abstraction de quelques rares cas de miscibilité illimitée entre certains liquides, pour chaque couple solvant – soluté il existe une limite de solubilité conduisant à l'obtention d'une *solution saturée*.

À 20°C, la solubilité du chlorure de sodium (NaCl) dans l'eau est de 26,4 %. Elle change peu lorsque la température s'élève. À 50 °C, elle est de 26,9 %. Pour d'autres substances, la sensibilité à l'élévation de température est beaucoup plus grande. Ainsi, pour le nitrate de potassium (KNO_3), elle passe respectivement de 24,2 %, valeur presque identique à celle du chlorure de sodium, à 45,7 % soit presque un doublement. De manière générale, la solubilité s'accroît avec la température sauf dans de très rares cas. Ainsi, le sulfate de lithium (Li_2SO_4) voit sa solubilité légèrement diminuer de 25,6 % à 24,8 % lorsque la température de la solution s'élève de 20 à 50 °C.

Lorsque la solution concerne un soluté dont la solubilité dans le solvant considéré s'élève avec la température (cas le plus fréquent comme nous l'avons vu), on peut rencontrer des situations dans

laquelle la solution peut être dans un état de *supersaturation*. En effet, lors d'un refroidissement lent de la solution, il peut arriver que la proportion de soluté dans le solvant à la température de la solution soit supérieure à la limite théorique de solubilité sans que le soluté ne précipite ! Il s'agit à l'évidence d'un état instable.

Les solutions saturées présentent une caractéristique très importante : pour une température donnée, l'humidité d'équilibre au dessus de la solution est parfaitement définie. Cette propriété est mise à profit pour réaliser des étalons d'humidité relative ou pour effectuer un contrôle précis de l'humidité relative dans une vitrine. Le tableau suivant donne les valeurs d'humidité relative d'équilibre de quelques substances sélectionnées pour trois températures différentes.

Solution saturée de…	**θ = 15 °C**	**θ = 20 °C**	**θ = 25 °C**
Chlorure de lithium	11,3 %	11,3 %	11,3 %
Chlorure de magnésium	33,3 %	33,1 %	32,8 %
Carbonate de potassium	43,1 %	43,2 %	43,2 %
Bromure de sodium	60,7 %	59,1 %	57,6 %
Chlorure de sodium	75,6 %	75,5 %	75,3 %
Chlorure de potassium	85,9 %	85,1 %	84,3 %
Sulfate de potassium	97,9 %	97,6 %	97,3 %

SOLVANT
Solvent

Substance **LIQUIDE** permettant la dissolution d'un **SOLUTÉ** pour former une **SOLUTION**. L'**EAU** est un très bon exemple de solvant.

SPECTRE
Spectrum

Répartition des valeurs d'une **GRANDEUR** physique en fonction d'une grandeur périodique. Par exemple, l'expression *spectre visible* désigne la répartition des composantes de la **LUMIÈRE** blanche naturelle en fonction de la longueur d'onde du **RAYONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE**. Ces composantes sont souvent désignées par des couleurs conventionnelles (dans l'ordre décroissant de longueur d'onde) : rouge, orange, jaune, vert, bleu, indigo, violet, dites encore couleurs de l'arc-en-ciel. De fait, le spectre de la lumière naturelle est *continu* : il n'y a pas de limite précise entre chaque couleur. Certaines sources de lumière artificielle sont caractérisées par des *spectres discontinus* présentant des raies (ou bandes) spécifiques à certaines longueurs d'onde. L'*analyse spectrale* permet d'identifier les diverses longueurs d'onde présentes dans un rayonnement. Elle est l'outil fondamental des astronomes et des physiciens de la matière.

Certaines propriétés de la matière vis-à-vis du rayonnement électromagnétique sont dépendantes des caractéristiques de ce rayonnement et notamment de sa longueur d'onde. Ces propriétés sont alors qualifiées de « spectrales » (→ *sélectivité spectrale* dans **ABSORPTION**).

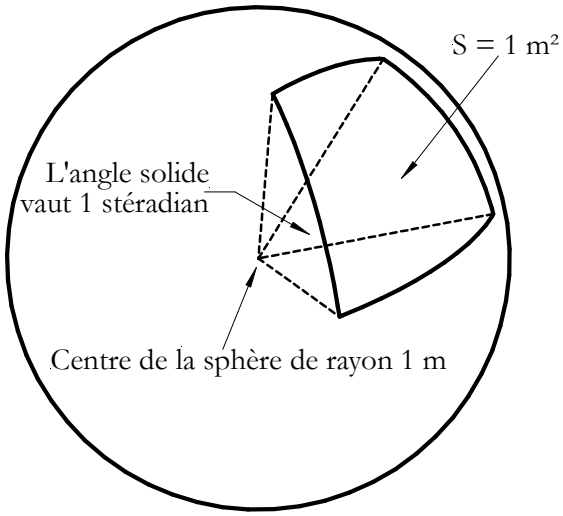
STATIQUE
Steady

Qualifie un **RÉGIME** stable dans le **TEMPS**, imposé à un **SYSTÈME** physique. S'oppose à **DYNAMIQUE**.

STÉRADIAN

sr

Steradian



Unité d'*angle solide* (sans dimension) dans le *Système SI*. Un angle solide (en volume) de un stéradian intercepte une surface de 1 m² sur l'enveloppe d'une sphère de rayon 1 m. La surface d'une sphère est égale à $4 \pi r^2$. Il s'ensuit qu'un angle solide a une valeur maximale égale à 4 π stéradians.

SUBLIMATION

Sublimation

Passage direct d'une substance de l'**ÉTAT** de **SOLIDE** à l'état de **GAZ**. Le **CHANGEMENT D'ÉTAT** inverse (passage direct de la **PHASE** gazeuse à la phase solide) est appelé **CONDENSATION**. La sublimation est mise à profit dans un procédé technologique, la *lyophilisation* (appelée encore *cryodessication*), qui permet de déshydrater un solide initialement humide. Le solide est tout d'abord placé dans une chambre froide. L'eau liquide s'y transforme en glace. Puis le solide est transféré dans un caisson dans lequel on maintient une pression nettement inférieure à la pression du *point triple* de l'eau (612 Pa). L'eau transformée en glace ne peut alors que se sublimer lorsqu'on chauffe par **RAYONNEMENT THERMIQUE** le solide gelé. La lyophilisation est un procédé couramment utilisé pour déshydrater des aliments ou sécher des ouvrages endommagés par une inondation.

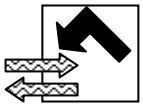
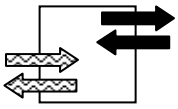
SYSTÈME

System

Ensemble plus ou moins complexe d'éléments matériels dont on veut analyser le comportement collectif. Un système se définit par son ou ses composants connus eux-mêmes par des *grandeurs intensives* et *extensives*. Un système est en général représenté par un **MODÈLE** s'attachant à décrire les relations physiques entre les composants et au sein même des composants, ainsi que par des **CONDITIONS AUX LIMITES** (températures et/ou **FLUX**) dépendant des échanges du système avec son environnement.

Lorsque ces échanges sont constitués de **MATIÈRE** et d'**ÉNERGIE**, on dit que le système est *ouvert*. Lorsque seuls les échanges d'énergie sont possibles, le système est dit *fermé*. Lorsqu'aucun échange n'est possible à la **FRONTIÈRE** du système, on parle de système *isolé*.

	Échange	**Échange**

		Matière →	énergie ⇨
Système isolé		Non	Non
Système fermé		Non	Oui
Système ouvert		Oui	Oui

Les échanges d'énergie peuvent intervenir sous deux formes : par échange de chaleur, par échange de travail. Lorsque les échanges de chaleur sont impossibles, le système est dit *adiabatique*.

SYSTÈME INTERNATIONAL D'UNITÉS

Système International d'Unités

D'application quasi-universelle, le Système International d'unités (*système SI* en abrégé) est l'héritier direct d'un enfant de la Révolution Française, le *système métrique* dont LAVOISIER disait en 1794, l'année de sa mort : « *Jamais rien de plus grand et de plus simple, de plus cohérent dans toutes ses parties, n'est sorti de la main des hommes.* ». De fait, ce système comportait encore de nombreux défauts.

Proposé en 1873, le système CGS (centimètre, gramme, seconde) constituait une avancée sensible. En effet, pour la première fois, un système d'unités était cohérent, ce qui signifie que les **UNITÉS** sont reliées entre elles, comme le sont les **GRANDEURS** auxquelles ses unités s'appliquent, sans faire appel à des facteurs numériques arbitraires.

S'il était cohérent, le système CGS n'en était pas pour autant complet. Le *système SI* est né de ce constat. Il fut mis en œuvre progressivement à partir de 1960. Il est régulièrement perfectionné au gré des Conférences Générales des Poids et Mesures qui se tiennent tous les quatre ans à Paris. Ces améliorations portent notamment sur la précision des définitions des unités. Ainsi, le mètre, unité de **LONGUEUR**, n'est plus rattaché au *Mètre des Archives*, l'étalon de 1799 dont la précision ne dépassait pas 0,01 mm. Aujourd'hui, il est ainsi défini : « Longueur du trajet parcouru par la **LUMIÈRE** dans le vide pendant un intervalle de 1/299 792 458 seconde ». C'est mieux, non ?

Le *système SI* comporte sept *unités de base* à partir desquelles sont construites toutes les autres unités, dites *unités dérivées*. Ainsi, l'unité dérivée de **VOLUME**, le mètre cube (m^3), est construite à partir de l'unité de base de longueur, le mètre. Par commodité, certaines unités dérivées ont reçu un nom spécial pour en faciliter l'usage. Ainsi, l'unité de **FORCE** qui s'écrit $(m \cdot kg)/s^2$, a été baptisée *newton* (symbole N).

Les sept unités de base du système SI sont les suivantes :

Grandeur	Nom	Symbole
Masse	kilogramme	kg
Longueur	mètre	m
Temps	seconde	s
Température absolue	kelvin	K
Quantité de matière	mole	mol
Courant électrique	ampère	A
Intensité lumineuse	candela	cd

Les cinq premières grandeurs de ce tableau font l'objet d'un développement spécifique dans ce lexique. Les définitions détaillées ainsi que quelques règles d'usage sont données dans la section annexe **Informations utiles sur les unités**.

Dans le domaine de la conservation, les phénomènes lumineux jouent un rôle important et les mécanismes par lesquels ils peuvent constituer un danger pour les biens culturels doivent être connus. Pour quantifier ces processus particuliers, des unités spécifiques ont été développées. Elles sont présentées dans le chapitre spécialisé **Grandeurs et unités photométriques**.

T

TEMPÉRATURE

°C

Temperature

GRANDEUR mesurant l'agitation thermique du réseau moléculaire constituant le milieu considéré. Elle se définit à partir de l'**ÉNERGIE CINÉTIQUE** moyenne des **MOLÉCULES**. L'échelle de température la plus couramment utilisée est l'*échelle Celsius* définie par la division en cent degrés (symbole °C) de l'intervalle entre la température de la glace fondante choisie arbitrairement comme le zéro de l'échelle, et la température de l'eau bouillante à la *pression atmosphérique normale* (101 325 Pa).

Le nom de l'échelle rappelle la mémoire d'Anders CELSIUS (1701-1744), physicien et astronome suédois. Il est l'inventeur de cette échelle centésimale qu'il avait curieusement inversée : pour lui, l'eau bouillait à 0 et la glace fondait à 100 degrés.

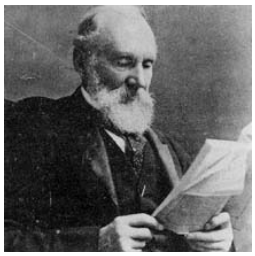
Il existe d'autres échelles thermométriques dont les plus connues sont les *échelles Réaumur* et *Fahrenheit* (→ **Les échelles thermométriques**).

TEMPÉRATURE ABSOLUE

K

Absolute temperature

Température de référence correspondant à une cessation totale de l'agitation thermique. Dans l'*échelle Celsius*, cette température limite est égale à – 273,15 °C. L'échelle des *températures absolues*, dite aussi échelle **THERMODYNAMIQUE**, a été construite à partir de ce point de référence appelé naturellement *zéro absolu*. Mesurées sur cette échelle, les températures sont exprimées en kelvin (symbole K). Par définition de l'échelle, la température absolue est toujours notée par un nombre positif. La conversion entre degré Celsius et kelvin est aisée. Pour obtenir une température absolue à partir d'une température donnée en degré Celsius, il suffit d'ajouter 273,15. Qu'on se réfère à l'échelle



Lord Kelvin (DR).

Celsius ou à l'échelle absolue, les intervalles de température sont exprimés par un même nombre. Il a donc été convenu de noter tous les écarts ou intervalles de température en kelvin. Attention : on dit « kelvin » et non « degré kelvin ».

Le kelvin est une unité fondamentale du *système SI*. Il commémore le nom du physicien irlandais William THOMSON devenu lord KELVIN (1824-1907), inventeur de l'échelle absolue.

Il existe une autre échelle thermométrique absolue connue sous le nom d'*échelle Rankine* (→ **Les échelles thermométriques**).

TEMPÉRATURE HUMIDE

°C

Wet-bulb temperature

Température de l'air mesurée avec un thermomètre dont le bulbe est maintenu humide avec une eau parfaitement pure à l'aide d'un dispositif approprié. Plus l'air sera sec, plus l'évaporation de l'eau autour du bulbe du thermomètre abaissera sa température. Un écart important entre la **TEMPÉRATURE SÈCHE** et la température humide signe une grande sécheresse de l'air. Connaissant la **PRESSION ATMOSPHÉRIQUE** et les températures sèche et humide d'un volume d'air humide mesurées avec un **PSYCHROMÈTRE** par exemple, on peut en déduire par le calcul, ou graphiquement à l'aide d'un **DIAGRAMME PSYCHROMÉTRIQUE**, toutes les autres caractéristiques du mélange.

La température humide d'un air humide peut avoir une valeur négative quand elle est exprimée dans l'échelle Celsius. Mais dans ce cas, bien évidemment, sa mesure n'est pas possible.

TEMPÉRATURE DE RAYONNEMENT

°C, K

Radiant temperature

Température uniforme de rayonnement qui serait celle d'une enceinte fictive pour laquelle le **RAYONNEMENT THERMIQUE** serait le même que dans l'environnement réel non uniforme considéré. Dite aussi *température radiative*. Dans la très grande majorité des cas, la **TEMPÉRATURE** des parois d'un local n'est pas identiques en tous points. Ce fait résulte des différentes **CONDITIONS AUX LIMITES** supportées par les dites parois. Il en résulte un rayonnement thermique asymétrique dans le local. Cependant, il est commode de définir une valeur unique de la température de rayonnement pour faciliter notamment une prévision du confort thermique des occupants ou bien le comportement d'objets placés dans l'ambiance. Lorsque dans un local, la vitesse d'air demeure modérée, la sensation de confort d'un individu résulte à part égale de la température sèche et de la température de rayonnement. On définit alors une *température opérative* égale à la moyenne arithmétique entre la température d'air et la température de rayonnement.

TEMPÉRATURE DE ROSÉE

°C

Dew point temperature

TEMPÉRATURE à laquelle il faut refroidir une certaine **MASSE** d'**AIR HUMIDE** pour l'amener à **SATURATION**. Connaissant la **TEMPÉRATURE SÈCHE** de l'air humide considéré, la connaissance de cette température de rosée permet de déterminer toutes ses caractéristiques hydriques : **RAPPORT DE MÉLANGE**, **ENTHALPIE**, **TEMPÉRATURE HUMIDE**, **MASSE VOLUMIQUE**, etc.

Nommons θ_r, la température de rosée, θ_h, la température humide et θ_s, la température sèche. Quelles que soient les caractéristiques d'un mélange air sec plus vapeur d'eau, la relation suivante est toujours vérifiée :

$$\theta_r \leq \theta_h \leq \theta_s.$$

Dans le cas où le mélange est à saturation, la relation devient :

$$\theta_r = \theta_h = \theta_s.$$

TEMPÉRATURE SÈCHE

°C

Dry-bulb temperature

TEMPÉRATURE de l'air mesurée avec un thermomètre à bulbe sec (exemple typique : le thermomètre à mercure ou à alcool). Par extension, température mesurée par tout dispositif thermométrique « sec » tels les thermographes à tambour munis d'un bilame métallique ou bien les thermomètres à résistance platine ou à thermistor inclus dans les enregistreurs numériques. Lorsqu'on parle de température d'air, sans autre précision, il s'agit toujours de la température sèche. Elle s'oppose à la **TEMPÉRATURE HUMIDE**.

Le couplage d'un thermomètre sec et d'un thermomètre humide forme un **PSYCHROMÈTRE**. Dans une ambiance donnée, l'écart mesuré entre température sèche et température humide par un psychromètre est directement relié à l'état hydrique de l'air.

TEMPS

s

Time

DIMENSION essentielle, avec l'**ESPACE**, de tout **SYSTÈME** physique. Le temps est l'une des sept **GRANDEURS** fondamentales du Système d'unité SI. L'unité légale est la seconde. L'une de ses propriétés fondamentales est son *orientation*. Cette singularité implique qu'aucun signal ne peut retourner dans le passé alors qu'il peut se propager librement dans toutes les directions de l'espace à trois dimensions. Ainsi, le *Deuxième principe* de la **THERMODYNAMIQUE** repose fondamentalement sur l'hypothèse (jamais contredite à ce jour) de l'irréversibilité d'un processus temporel.

En bon physicien, nous ne nous préoccupons pas de la nature du temps (qui demeure encore en grande partie une question philosophique) mais plutôt de sa représentation correcte dans les modèles physiques où il intervient (→ **DYNAMIQUE**).

TENSION SUPERFICIELLE

J/m², N/m

Surface tension

Force qui se manifeste à la surface d'un **LIQUIDE**. Elle est due à la **COHÉSION** des **MOLÉCULES** qui le constituent. Au sein d'un liquide, les forces de **COHÉSION** s'équilibrent. Ce n'est pas le cas en surface. Il en résulte une force d'attraction dirigée vers l'intérieur du liquide. Cette force s'oppose à l'augmentation de la surface du liquide. La surface peut être vue comme une membrane élastique dont la déformation nécessite un certain travail. Le rapport du travail à fournir ΔW pour augmenter la surface d'une certaine quantité ΔS est appelé tension de surface et est noté σ. On a la relation : $\sigma = \Delta W / \Delta S$.
Elle s'exprime donc en J/m² ou, ce qui revient au même, en N/m. Notée en newton par mètre, la tension de surface apparaît comme une

force par unité de longueur.

THERMODYNAMIQUE

Thermodynamics

Sadi Carnot est mort du choléra à Paris à l'âge de 36 ans (DR).

Étude des rapports phénoménologiques entre la **CHALEUR** et le mouvement. Depuis sa naissance au XIX^e^ siècle avec l'œuvre visionnaire du jeune Sadi CARNOT (1796-1832) qui publia à compte d'auteur en 1824 (il n'avait que 28 ans !) ses magistrales *Réflexions sur la puissance motrice du feu*, la thermodynamique a très largement redéfini sa problématique en proposant une description des propriétés macroscopiques de la **MATIÈRE** en termes de **GRANDEURS** physiques cohérentes et en établissant des relations universelles entre ces grandeurs. À cet égard, elle concerne aujourd'hui toutes les disciplines scientifiques majeures, de l'énergétique qui l'a vue naître, à la chimie et l'astrophysique en passant par la biologie.

L'effort de très nombreux chercheurs autour de cette discipline centrale de la physique s'est traduit par un petit nombre de propositions fondamentales qui ont été baptisées *Principes de la thermodynamique*. On en compte quatre. Il n'existe pas d'énoncé standard de chacun des principes. Pour des raisons pédagogiques, chaque auteur a tendance à proposer une formulation qui lui est propre. Bien évidemment, tous les énoncés d'un principe donné sont strictement équivalents (ou devraient l'être !).

Principe zéro : « Deux **SYSTÈMES** en **ÉQUILIBRE** thermique avec un troisième, sont en équilibre thermique entre eux. » L'équilibre thermique signifie que les systèmes ont même **TEMPÉRATURE**. Tous les **THERMOMÈTRES** constituent une application du principe zéro. Ce principe résulte d'un constat d'expérience : si deux systèmes entrent en contact, des échanges vont se produire de telle sorte que toutes les *grandeurs intensives* caractérisant les systèmes (température, **PRESSION**, etc.) aient, *in fine*, la même valeur.

Premier principe : « La variation totale d'**ÉNERGIE** d'un système procède par échange de travail et de chaleur. » Ce principe repose sur le fait que l'énergie, à l'instar de la matière, ne peut être ni produite, ni détruite. Il s'en suit que, dans un système isolé, l'énergie totale est une quantité conservée. Le principe de conservation de l'énergie est l'une des clés fondamentales de la physique. Dans l'étude des systèmes, le bilan des échanges avec l'environnement est crucial si l'on veut respecter le Premier principe.

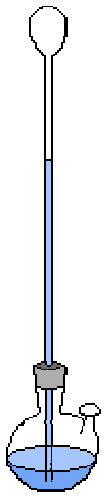
Deuxième principe : « Il n'existe pas de processus qui diminue l'**ENTROPIE** totale de l'univers. » L'entropie étant une mesure du « désordre », le deuxième principe donne une formulation au constat que l'univers tend vers un « désordre » toujours plus grand. Selon un autre énoncé apparemment très éloigné du premier, le deuxième principe affirme qu'il est impossible de réaliser une transformation d'un système dont l'unique résultat serait l'absorption de chaleur à partir d'une « source chaude » et sa transformation totale en travail. Ce deuxième principe a de profondes conséquences et implications qui sont explorées en détail dans un ouvrage très recommandable [ATKINS, 1987].

Troisième principe : « Au zéro absolu, tout corps possède une entropie nulle. » En effet, à cette température, le corps constitue un système parfaitement immobile, dépourvu de toute agitation moléculaire et dont l'ordre (par opposition au désordre que mesure l'**ENTROPIE**) est donc parfait. Le nombre d'états microscopiques Ω qui le caractérise est donc égal à 1. En appliquant la *loi de Boltzmann* (→ **ENTROPIE**), on trouve bien $S = k_B \ln 1$, $S = 0$. Dans cet état, si le corps reçoit la plus infime quantité de chaleur, il subira une augmentation finie de sa température. Le nombre d'états microscopiques possibles augmentera alors immédiatement ainsi que l'entropie du système.

THERMOMÈTRE

Thermometer

Appareil de mesure permettant de repérer la **TEMPÉRATURE** d'un milieu solide, liquide ou gazeux. Pour leur construction, les thermomètres font appel à des phénomènes physiques extrêmement variés : changement de couleur, dilatation, résistance électrique variable, etc. Il ne faut jamais oublier qu'un thermomètre ne délivre une information que sur sa propre température ! Tout l'art de la mesure (*thermométrie,* une branche de la **MÉTROLOGIE**) consistera à faire en sorte que le thermomètre soit disposé dans des conditions telles qu'il soit en équilibre thermique avec le **SYSTÈME** dont on veut connaître la température, et ceci en application du principe zéro de la **THERMODYNAMIQUE**. On pourra alors considérer que le dispositif de mesure indique une température très proche, sinon égale à celle du système mesuré. Cependant, d'un point de vue dynamique, on peut affirmer qu'un thermomètre n'indiquera jamais la température réelle d'un système physique si celle-ci varie. L'erreur sera d'autant plus grande que la *constante de temps* du thermomètre est grande en regard de la *période* des phénomènes observés. On appelle « constante de temps » (notée τ) d'un instrument de mesure la durée nécessaire pour que ledit instrument détecte 63,2 % d'un changement brutal du paramètre mesuré. Certains fabricants d'appareils de mesure donnent le temps de réponse à 50 % de la variation totale, d'autres à 99 %. Il convient donc d'étudier les fiches techniques décrivant les instruments avec beaucoup d'attention.



Thermoscope à alcool proposé par G. Galilei (DR).

« En 1606, Galilée construit son premier *thermoscope*, premier appareil de l'histoire à mesurer la température. » Lue dans une grande encyclopédie en ligne sur Internet, cette phrase ne contient pas moins de trois erreurs ! La plus évidente est qu'un thermoscope, comme son nom l'indique, ne mesure pas la température mais permet seulement d'observer ses variations. Quel en est le principe ? Décrivons le dispositif le plus simple. Un ballon plein d'air et fermé par un tube plongeant dans un récipient plein d'eau. Quand la température de l'air dans le ballon augmente, son volume s'accroit également et le niveau de l'eau dans le tube s'abaisse. À l'inverse, quand la température du ballon supérieur s'abaisse, le niveau de l'eau dans le tube augmente. La deuxième erreur consiste à attribuer le thermoscope au génie de Pise, Galileo GALILEI dit GALILÉE (1564-1642). L'innovation de GALILEI fut de remplacer l'eau par de l'alcool. De fait, le thermoscope était connu des savants grecs. Ceux imaginés par PHILON de Byzance (III^e^ siècle avant notre ère) et HÉRON l'Ancien (I^er^ siècle de notre ère) nous

sont connus. La troisième erreur, conséquence des deux autres, est donc d'attribuer l'invention du thermomètre à GALILEI. C'est à Santore SANTORIO (1561-1636), un médecin de Padoue, qu'on doit l'idée fondamentale exprimée en 1612, d'ajouter un repère gradué à un thermoscope, le transformant ainsi en véritable thermomètre capable de mesurer la température de l'air expiré par ses patients. N'en déplaise à ses hagiographes, Galileo GALILEI n'est donc ni l'inventeur du thermoscope, ni celui du thermomètre.

TRANSITION VITREUSE

Glass transition

Changement d'état propre à certains matériaux (**POLYMÈRES**). En deçà d'une certaine température dite *température de transition vitreuse* (elle est notée T_g et est propre à chaque matériau), les chaînes moléculaires constitutives de ces matériaux ont un comportement mécanique rigide. Le matériau est alors dur et souvent cassant. Il est dit dans un état vitreux. Au voisinage de T_g, le matériau présente des propriétés visco-élastiques. Au delà de T_g, la mobilité relative des chaînes moléculaires s'accroît. Le comportement du matériau devient plastique ou caoutchoutique.

TRANSITOIRE

Transient state

Se dit d'un **RÉGIME** où le **SYSTÈME** physique considéré tend vers un état d'**ÉQUILIBRE** après avoir connu une modification de ses **CONDITIONS AUX LIMITES**, celles-ci redevenant constantes.

TRAVAIL

J

Work

Effet résultant d'une **FORCE** qui déplace son point d'application. Étymologiquement le substantif « travail » dérive d'un mot latin, *tripalium*, qui désignait un instrument de torture. C'est sans doute la raison pour laquelle on utilise usuellement ce mot pour désigner une activité professionnelle rémunérée. Loin des exigences économiques du quotidien, les physiciens utilisent le terme travail dans un sens très différent.

Pour un **SYSTÈME** physique soumis à une force et donc recevant un travail, la conséquence apparente pourra être un déplacement, une déformation, ou un échauffement. Les recherches menées au XIX^{e} siècle, et notamment celles de James JOULE, ont permis d'établir l'équivalence entre **ÉNERGIE** et travail. Le travail s'exprime donc, comme l'énergie, en joule [J].

U

UNITÉ

Unit

GRANDEUR conventionnelle par rapport à laquelle toutes les grandeurs de même nature sont comparées. La mesure d'une grandeur conduit à déterminer une valeur numérique, un simple nombre, qui ne prend sens que par rapport à l'unité physique correspondante. Ainsi, mesurer une **LONGUEUR**, par exemple, revient à établir une comparaison entre l'objet mesuré et l'étalon de longueur choisi dans le système d'unités retenu.

La destruction de MCO dans l'atmosphère de Mars est due à une erreur de conversion d'unités. (Source : http://www.nirgal.net/mco_end.html)

L'ensemble des unités nécessaires à la description des phénomènes physiques connus forme un *système d'unités*. Il en existe plusieurs. Le système adopté par la très grande majorité des pays est dénommé **SYSTÈME INTERNATIONAL D'UNITÉS** (en bref, *système SI*).

La conversion d'unités entre systèmes différents est toujours une tâche délicate et une source inépuisable de pertes de temps et d'argent. Pour ne citer qu'un exemple parmi d'innombrables, le 22 mars 1999, la mission spatiale *Mars Climate Orbiter* lancée par la NASA échouait lamentablement pour une vulgaire erreur de conversion d'unités. La firme américaine Lockheed Martin Astronautics, qui avait construit la sonde, utilisait des unités dites impériales (pouce, degré Farenheit, etc.) tandis que les ingénieurs du Jet Propulsion Laboratory avaient fondé leurs programmes de navigation sur les unités du *système SI*. Coût de l'erreur : 125 millions de dollars.

L'*analyse dimensionnelle* est une technique extrêmement utile pour résoudre ce type de problèmes.

V

VAN DER WAALS (FORCES DE)

Van der Waals'forces

FORCES attractives qui s'exercent entre les **MOLÉCULES** d'un milieu solide ou liquide. Elles sont d'origine électrostatique. Elles interviennent également dans les **GAZ** et permettent d'expliquer les différences constatées entre les propriétés des **GAZ PARFAITS** et celles des gaz réels. C'est Johannes Diderik VAN DER WAALS (1837-1923) qui, le premier, conjectura l'existence d'interactions entre molécules pour expliquer les différences observées entre gaz réels et gaz parfaits. Voilà pourquoi il était légitime de nommer ces interactions du nom de ce physicien néerlandais qui reçut le prix Nobel en 1910. Ces forces de Van der Waals sont au nombre de trois :

J. D. Van der Waals (Doc. Nobel Fondation).

- *Les forces de Keesom*. Deux molécules polaires (chlorure d'hydrogène HCl, acétone CH_3COCH_3, …) s'attirent à la manière de deux aimants, le pôle positif de l'une attirant le pôle négatif de l'autre.
- *Les forces de Debye*. Une molécule polaire crée autour d'elle un **CHAMP** électrique qui induit une polarité au sein des molécules, polaires ou non, de son voisinage. Entre la molécule polaire et la molécule subissant une polarité induite, s'exercent des forces d'attraction semblables aux forces de Keesom.
- *Les forces de London*. Les forces d'attraction décrites précédemment supposaient que l'une au moins des molécules concernées était polaire. Or, entre molécules non polaires, il s'exerce également une interaction de nature électrostatique. En effet, l'absence de polarité d'une molécule n'est qu'un effet de moyenne dans le temps. À chaque instant, la distribution des charges électriques dans l'espace n'est pas homogène et crée par conséquent une polarité. Deux molécules voisines vont donc interagir. L'instant suivant, la position des charges

dans l'espace va changer induisant une modification de la polarité. En moyenne, la polarité de l'ensemble est nulle. Pourtant une interaction subsistera entre les molécules et assurera leur cohésion. Bien entendu, cet effet existe aussi entre molécules polaires. Aussi les forces de London s'ajoutent aux forces de Keesom et de Debye.

Les **ÉNERGIES** mises en jeu dans les interactions de Van der Waals sont de l'ordre de quelques kJ/mol. Ces valeurs sont beaucoup plus faibles que celles qui caractérisent les liaisons hydrogènes, une forme particulière des forces électromagnétiques intermoléculaires.

VAPEUR

Vapor

Synonyme de **GAZ**. Une substance formant un gaz, placée dans des conditions de **PRESSION** et de **TEMPÉRATURE** telles qu'elle demeure en **ÉQUILIBRE** avec une quantité, aussi petite soit-elle, de la même substance en phase liquide, est dite en état de *vapeur saturante*. Par opposition, lorsque le dit gaz est loin du point d'équilibre envisagé, on le dénomme *vapeur sèche* (!). La pression correspondant à l'état d'équilibre des phases vapeur et liquide est dite **PRESSION DE VAPEUR SATURANTE**.

Ces *cumulus humulis* **ne sont pas** de la vapeur d'eau mais des nuages de gouttelettes d'eau plongés dans une atmosphère d'air humide (DR).

VAPORISATION

Vaporisation

Phénomène de **CHANGEMENT D'ÉTAT** entre une phase liquide et une phase gazeuse. Il peut se manifester sous deux formes : l'**ÉBULLITION** et l'**ÉVAPORATION**.

VARIÉ

Unsteady

Se dit d'un **RÉGIME** où le **SYSTÈME** physique supporte des **CONDITIONS AUX LIMITES** variables. Si les variations des conditions aux limites sont cycliques, on parlera de régime **PÉRIODIQUE**.

VIDE

Vacuum

Fraction d'espace dépourvu de toute **MATIÈRE**. De fait, le vide parfait n'existe pas. Ainsi, même les espaces intersidéraux ne sont pas « vides », à proprement parler. On y croise des **FLUX** corpusculaires (*électrons*, *protons*, noyaux de calcium, de fer, de nickel, d'oxygène, de carbone, etc.) et de matière (macro et micrométéorites). On parlera donc de vide relatif caractérisé par une **PRESSION** résiduelle exprimée en pascals. Les principaux domaines du vide sont définis dans le tableau suivant :

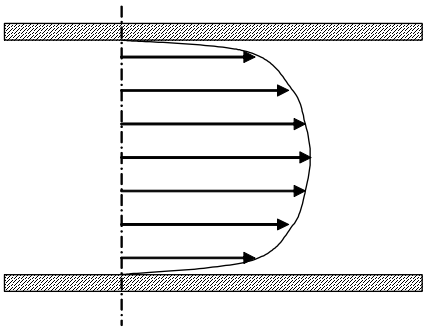
- Vide grossier .....de 101 325 Pa à 100 Pa.
- Vide primaire .....de 100 Pa à 10^{-1} Pa.
- Vide secondaire .....de 10^{-1} Pa à 10^{-5} Pa.
- Ultravide .....de 10^{-5} Pa à 10^{-9} Pa.
- Vide extrême.....inférieur à 10^{-9} Pa.

Les tubes à vide utilisés dans l'électronique entrent dans le domaine de l'ultravide. Dans l'anneau de confinement du synchrotron Soleil d'une circonférence de 354 mètres, en cours d'achèvement à Saclay, on maintient un vide de 10^{-7} Pa. Cet instrument de recherche produira des rayons X (une forme très énergétique de **RAYONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE** qui les rend très pénétrants) pour sonder la matière. L'espace intersidéral correspond à un vide extrême. À 300 km d'altitude, la pression n'est plus que de 10^{-10} Pa. Au niveau de la mer, la densité moléculaire est supérieure à 26 milliards de milliards de **MOLÉCULES** par cm^3 contre moins d'une molécule par cm^3 dans l'espace interplanétaire !

VISCOSITÉ

Viscosity

Propriété macroscopique d'un **FLUIDE** traduisant la plus ou moins grande aptitude de ses **MOLÉCULES** à glisser les unes par rapport aux autres. Pour un **LIQUIDE**, la viscosité résulte essentiellement des forces d'attraction entre les molécules. Elle diminue donc logiquement avec la **TEMPÉRATURE**. Les forces d'attraction intermoléculaires étant négligeables dans un **GAZ**, sa viscosité traduit un échange de quantité de mouvement entre les molécules. Il s'ensuit que la viscosité d'un gaz augmente avec la température et la **PRESSION**.



Profil de vitesse dans une canalisation. Le frottement sur les parois ralentit le localement le fluide. Ce frottement provoque un glissement relatif des filets fluides les uns par rapport aux autres. Au centre de la canalisation, le fluide présente donc une vitesse supérieure à celle qu'il possède à proximité des parois de la canalisation.

VOLUME MASSIQUE

m^3/kg

Specific volume

Volume occupé par un kilogramme de substance. Inverse de la **MASSE VOLUMIQUE**.

VOLUME MOLAIRE

m^3/mol

Molar volume

Volume occupé par une **MOLE** de la matière considérée placée dans les **CONDITIONS NORMALES** (pour mémoire : température égale à 0°, **PRESSION** égale à 101 325 Pa). Cette définition s'applique aux **SOLIDES**, aux **LIQUIDES** et au **GAZ**.

On retiendra qu'une mole d'un gaz quelconque maintenue aux conditions normales, occupe toujours le même volume. Noté V_0, le volume molaire des gaz vaut :

$$V_0 = 22{,}414 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{m}^3.$$

Ce résultat a priori surprenant est la conséquence d'une belle découverte du physicien et chimiste italien Amedeo AVOGADRO (1776-1856) qui proposa une *loi* portant désormais son nom, et stipulant que deux volumes égaux de gaz différents, placés dans les mêmes conditions de température et de pression, contiennent exactement le même nombre de molécules. On se souvient peut être davantage d'Avogadro au travers du *nombre* éponyme qui indique le nombre de molécules contenues dans une mole de matière.

La valeur universelle et constante de V_0 facilite les calculs relatifs aux gaz. Ainsi, sachant que la **MASSE MOLAIRE** de l'air sec vaut sensiblement 29 g/mol (soit $29 \cdot 10^{-3}$ kg/mol), il est aisé de calculer la **MASSE VOLUMIQUE** de l'air sec aux conditions normales :

$$\varrho = 29 \cdot 10^{-3}/22{,}414 \cdot 10^{-3} \text{ soit } 1{,}29\ \mathrm{kg/m^3}.$$

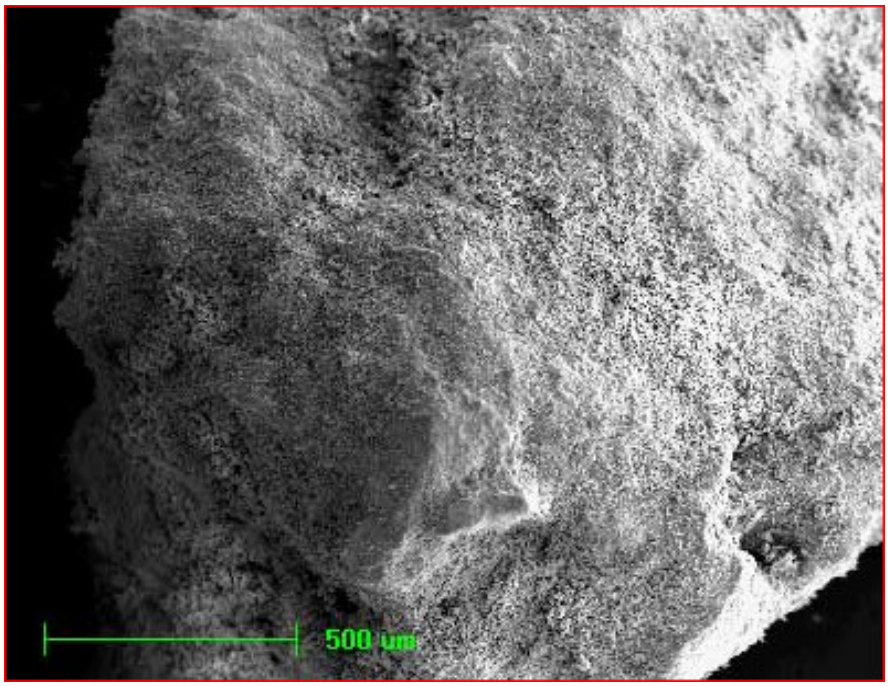
Z

ZÉOLITHE

Zeolite

Structure cristalline microporeuses dont les *pores* ont une taille comprise entre 0,3 et 1 nm (→ **POROSITÉ**), formée essentiellement de silicium, d'aluminium et d'oxygène. Sous l'influence anglo-saxonne, le mot est parfois écrit « zéolite ». Précisons qu'en français, le mot est du genre féminin. De composition proche de celle des argiles, les zéolithes sont chimiquement classées dans les aluminosilicates hydratés. D'origine naturelle ou industrielle, elles bénéficient de remarquables propriétés d'**ADSORPTION** moléculaire qui les destinent à de nombreuses applications dans la pétrochimie, la purification de l'eau, la *filtration chimique* des **GAZ**, etc. Les zéolithes peuvent aussi être utilisées comme régulateur d'**HUMIDITÉ RELATIVE** dans des espaces clos de petites dimensions (boîtes, vitrines, etc.)

Les zéolithes représentent un marché mondial de plusieurs millions de tonnes par an. Les zéolithes sont aussi appelés *tamis moléculaires*.



Grain de zéolithe. La structure microporeuse est parfaitement visible sur ce cliché (Doc. R. Van Nerum).

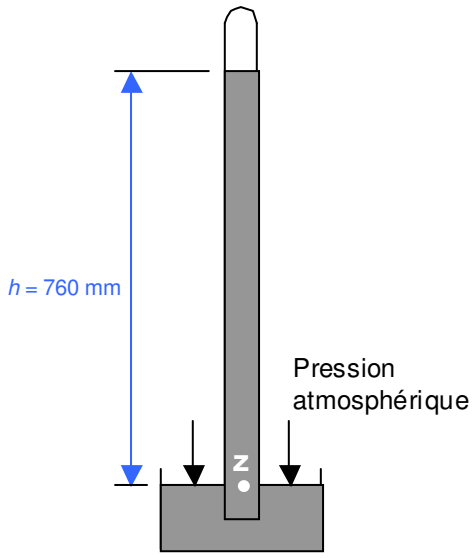
Compléments

« TRISSOTIN
J'ai cru jusques ici que c'était l'ignorance
Qui faisait les grands sots, et non pas la science.

CLITANDRE
Vous avez cru fort mal, et je vous suis garant
Qu'un sot savant est sot plus qu'un sot ignorant. »

MOLIÈRE. – *Les Femmes Savantes*, 1672, acte IV, scène 3

Le tube de Torricelli et la pression atmosphérique



Le point **Z** se trouve dans le tube de Torricelli, au même niveau que celui du mercure dans la cuvette. Puisque notre système est en équilibre, la pression qui règne en ce point est égale à la pression atmosphérique. Or, en ce point, la seule force qui s'exerce est le poids de la colonne fluide placée au dessus. Vérifions que cette force produit bien une pression égale à la pression atmosphérique.

Soit S la section du tube. Le volume V de cette colonne est donc (en unité SI) :

$$V = 0{,}760\ S.$$

La masse de cette colonne s'obtient en multipliant le volume (en m^3) par ϱ la masse volumique du mercure exprimée en kg/m^3. Cette masse volumique vaut 13 546 kg/m^3 (à 20 °C). La masse M de la colonne vaut donc :

$$M = 10294{,}96\ S.$$

Le poids d'un objet quelconque est obtenu en multipliant sa masse par g, l'accélération de la pesanteur. Cette dernière est égale à 9,81 m/s^2 au niveau de la mer. Le poids F (en newtons) de la colonne de mercure s'établit à :

$$F = 100993{,}56\ S.$$

Il ne reste plus qu'à calculer la pression exercée par la colonne de mercure au point **Z**. Rappelons que la pression est la contrainte qu'exerce une force sur une surface. Elle s'obtient en divisant la valeur de la force (exprimée en newtons) par la mesure de la surface concernée (exprimée en mètre carré). Dans le cas analysé, la surface concernée est S. Nous ne lui avons pas donné de valeur numérique pour mieux faire apparaître qu'apparaissant deux fois dans le calcul, une première fois par multiplication et une seconde fois par division, elle ne joue, de fait, aucun rôle dans la valeur numérique recherchée. Nous obtenons finalement la valeur de la pression (exprimée en pascals) :

$$P = F/S$$

$$P = 100\ 993{,}56\ \text{Pa}.$$

La valeur que nous obtenons est très proche de la valeur standard : 101325 Pa (à 0,3 % près).

Les calculs précédents se résument en une formule unique :

$$P = h \cdot \rho \cdot g.$$

Quelle hauteur aurait atteint la colonne de liquide si, au lieu de mercure, nous avions utilisé de l'eau ?

Pour répondre à la question, il suffit de « retourner » la formule précédente :

$$h = P / (\rho \cdot g).$$

On rappelle que la masse volumique de l'eau vaut approximativement 1000 kg/m^3 à 20 °C. On obtient le résultat suivant :

$$h = 101\ 325 / (1000 \cdot 9{,}81)$$

$$h = 10{,}32 \text{ m}.$$

On voit tout l'intérêt de réaliser un baromètre avec du mercure plutôt qu'avec de l'eau !

Les échelles thermométriques

Rappel :

TEMPÉRATURE : Grandeur mesurant l'agitation thermique de l'ensemble moléculaire constituant le milieu considéré. Elle se définit à partir de l'énergie cinétique moyenne des molécules. Il existe une température de référence correspondant à une cessation totale de l'agitation thermique. Dans l'échelle Celsius (symbole **°C**), cette température est égale à – 273,15 °C. L'échelle des températures absolues, dite aussi, échelle thermodynamique, a été construite à partir de ce point de référence appelé naturellement *zéro absolu*. Mesurées sur cette échelle, les températures sont exprimées en kelvin (symbole **K**).

• *Échelles thermométriques de référence*

o Échelle Kelvin

Nom de l'unité : kelvin.

Symbole : K.

Définition :

Le kelvin est l'une des sept unités fondamentales du Système International. Il est égal à la fraction 1/273,16 de la température thermodynamique du point triple de l'eau[1].

Commentaire :

Dite aussi échelle thermodynamique ou encore échelle de température absolue. Pour éviter toute confusion, la température exprimée en échelle absolue est toujours notée avec un symbole majuscule : *T*. La température absolue est toujours notée par un nombre positif.

Relations :

Par définition le zéro absolu T_0 vaut 0 K : $T_0 = 0$ K.

La définition du kelvin conduit à l'égalité 1 K = 1 °C.

o Échelle Celsius

Nom de l'unité : degré Celsius.

Symbole : °C.

Définition :

Le degré Celsius est la centième partie de l'intervalle de température séparant le point de fusion et le point d'ébullition de l'eau pure à la *pression normale* de 101 325 Pa. Conventionnellement, la valeur 0 de l'échelle est fixée au point de fusion et la valeur 100 au point d'ébullition.

---

[1] Au *point triple*, les phases solide, liquide et gazeuse d'un corps pur coexistent en équilibre (→ **CHANGEMENT D'ÉTATS**). Pour un corps pur, il n'existe qu'un point triple défini par une température et une pression. Pour l'eau, la température du point triple est de 273,16 K ou encore 0,01 °C, et la pression de 612 Pa. La propriété des corps purs de n'avoir qu'un point triple est mis à profit pour la réalisation d'étalons de température.

Commentaire :

Apparue avant l'échelle thermodynamique, l'échelle Celsius est parfois nommée « échelle centigrade » ou encore « centésimale », expressions à éviter. Son usage est encore possible dans le cadre du système SI. Pour éviter toute confusion, les températures mesurées en degrés Celsius sont notées avec les symboles t ou θ.

Relation :

$$t \text{ (en °C)} = T \text{ (en K)} - 273{,}15.$$

• *Autres échelles thermométriques (pour information)*

o Échelle Réaumur

Nom de l'unité : degré Réaumur.

Symbole : °R.

Définition :

Le degré Réaumur[2] est la quatre-vingtième partie de l'intervalle de température séparant le point de fusion et le point d'ébullition de l'eau pure à la *pression normale* de 101 325 Pa. Conventionnellement, la valeur 0 de l'échelle est fixée au point de fusion et la valeur 80 au point d'ébullition.

Commentaire :

Créée un peu avant l'échelle Celsius, elle est désormais abandonnée.

Relation :

$$t' \text{ (en °R)} = 4/5\ t'' \text{ (en °C)}.$$

o Échelle Fahrenheit

Nom de l'unité : degré Fahrenheit.

Symbole : °F.

Définition :

Le degré Fahrenheit[3] est la centième partie de l'intervalle de température séparant le point de fusion d'un certain mélange glace-sel et la température du corps humain. Conventionnellement, la valeur 0 de l'échelle est fixée au point de fusion du mélange et la valeur 100 à la température du corps humain.

Commentaire :

Encore en vigueur dans les pays anglophones et notamment aux USA.

Relation :

$$t' \text{ (en °F)} = 9/5\ t'' \text{ (en °C)} + 32.$$

---

[2] RÉAUMUR (René Antoine FERCHAUD de), physicien et naturaliste français (1683-1757). Spécialiste des métaux, il introduit en 1730 l'échelle de température qui aujourd'hui porte son nom et crée un thermomètre à alcool gradué de 80 à 0°.

[3] FAHRENHEIT (Daniel), physicien allemand (1686-1736). Il propose en 1712 le premier thermomètre à mercure.

○ Échelle Rankine

Nom de l'unité : rankine.

Symbole : R.

Définition :

Le degré Rankine[4] est l'échelle de température absolue raccordée à l'échelle Fahrenheit.

Commentaire :

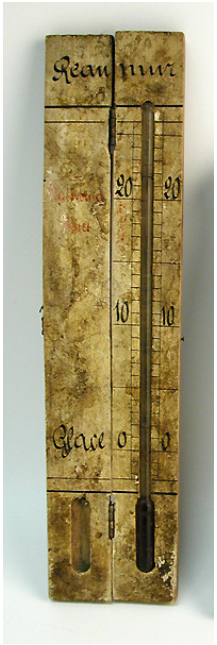
Voir commentaires pour l'échelle Fahrenheit.

Relation :

$$T' \text{ (en R)} = 9/5\ T'' \text{ (en K)}.$$

• *Pour résumer*

	Kelvin [K]	Celsius [°C]	Rankine [R]	Fahrenheit [°F]	Réaumur [°R]
Zéro absolu	0	-273,15	0	-459,67	- 218,52
Équilibre eau-glace à 101 325 Pa	273,15	0	491,67	32	0
Point triple de l'eau pure	273,16	0,01	491,69	32,018	0,008
Ébullition de l'eau à 101 325 Pa	373,15	100	671,67	212	80



(DR).

[4] RANKINE (William) : ingénieur et physicien britannique (1820-1872). Fondateur de l'énergétique.

Quelques informations utiles sur les unités

• LES UNITÉS DE BASE DU SYSTÈME SI

Grandeur	Dimension	Unité	Symbole	Définition
Masse	**M**	kilogramme	kg	Masse du prototype international du kilogramme.
Longueur	**L**	mètre	m	Longueur du trajet parcouru par la lumière dans le vide pendant un intervalle de 1/299 792 458 seconde.
Temps	**T**	seconde	s	Durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental d'un atome de césium 133.
Température thermodynamique	**Θ**	kelvin	K	Fraction égale à 1/273,16 de la température thermodynamique du point triple de l'eau pure.
Quantité de matière	**N**	mole	mol	Quantité de substance d'un système qui contient autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0,012 kilogramme de carbone 12.
Courant électrique	**I**	ampère	A	Intensité d'un courant qui, traversant deux conducteurs rectilignes, parallèles, de longueur infinie et de section négligeable, placés à un mètre de distance dans le vide, produit entre ces deux conducteurs une force égale à $2 \cdot 10^{-7}$ newton.
Intensité lumineuse	**J**	candela	cd	La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une radiation monochromatique de fréquence $540 \cdot 10^{12}$ hertz et qui présente, dans cette direction, une intensité énergétique de 1/683 watt par stéradian.

À partir de ces unités fondamentales, toutes les autres unités peuvent être définies par un simple jeu de multiplication et de division, sans aucun coefficient numérique, comme l'indique le schéma qui clôt ce chapitre.

Il est intéressant d'observer que les définitions de ces unités fondamentales ne sont pas indépendantes l'une de l'autre. Seules les définitions de la masse, du temps et de la température thermodynamique sont auto-suffisantes. Toutes les autres dépendent d'une, de deux, voire de trois autres définitions ! Les unités forment bien un **SYSTÈME** ! Les relations entre définitions sont illustrées par le schéma suivant dans lequel chaque grandeur fondamentale est représentée par sa dimension (→ **DIMENSION** dans le lexique).

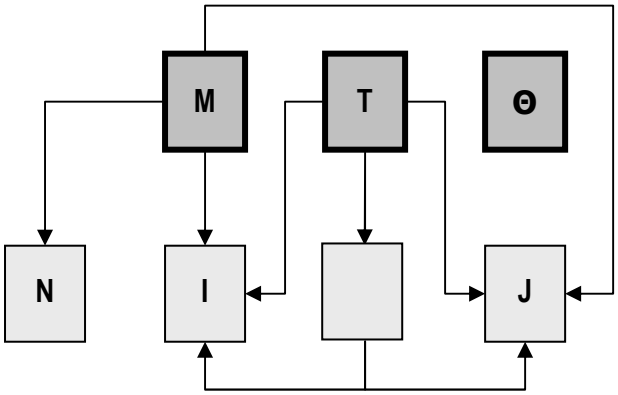


Schéma des relations existant entre grandeurs fondamentales telles qu'elles sont actuellement définies. Les grandeurs sont représentées par le symbole de leur dimension (voir tableau précédent). Les trois grandeurs dont les définitions sont auto-suffisantes sont encadrées d'un trait plus épais.

• MULTIPLES ET SOUS-MULTIPLES

La notation des unités fait très souvent appel à des préfixes qui permettent une notation plus compacte et lisible de la valeur numérique.

Le tableau suivant indique successivement le nom du préfixe, sa notation et sa valeur exprimée en puissance de 10.

Exa	E	10^{18}
Peta	P	10^{15}
Téra	T	10^{12}
Giga	G	10^{9}
Méga	M	10^{6}
Kilo	k	10^{3}
Hecto	h	10^{2}
Déca	da	10^{1}
Déci	d	10^{-1}
Centi	c	10^{-2}
Milli	m	10^{-3}
Micro	µ	10^{-6}
Nano	n	10^{-9}
Pico	p	10^{-12}
Femto	f	10^{-15}
Atto	a	10^{-18}

• UNE UNITÉ DE LONGUEUR SUR MESURE…

Une unité de longueur hors système SI demeure très utilisée : l'ångström. Elle tire son nom d'Anders Jonas ÅNGSTRÖM, un astronome suédois (1817-1874), pionnier de la spectroscopie. C'est une unité bien adaptée à l'expression des dimensions des atomes et molécules. On a la relation de définition : $1\ \text{Å} \equiv 10^{-10}\ \text{m}$.

• ÉCRITURE DES UNITÉS

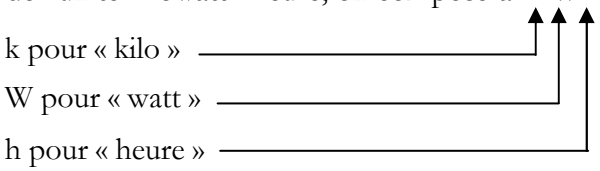
D'un point de vue orthographique, les *noms d'unités* doivent être considérés, sans exception, comme des noms communs et à ce titre doivent s'écrire en minuscules. Le cas échéant, ils doivent prendre le pluriel : un kilogramme, cent kilogrammes. En revanche, les *symboles* sont toujours invariables : 1 kg, 100 kg. Eux aussi s'écrivent en minuscules à la seule exception de ceux qui commémorent le nom de savants.

Exemples : volt (pour Alessandro Volta) : symbole **V** ; joule (pour James Joule) : symbole **J** ; watt (pour James Watt) : symbole **W** ; etc.

Les préfixes s'écrivent avec des minuscules comme « k » (pour kilo), « m » (pour milli), etc., sauf pour les préfixes représentant des puissances de 10 égales ou supérieures à 6. Ainsi, méga (10^6) s'écrit « M », giga (10^9) s'écrit « G », etc. Ces préfixes sont toujours attachés au symbole de l'unité : kW (kilowatt), mm (millimètre), MJ (mégajoule), etc.

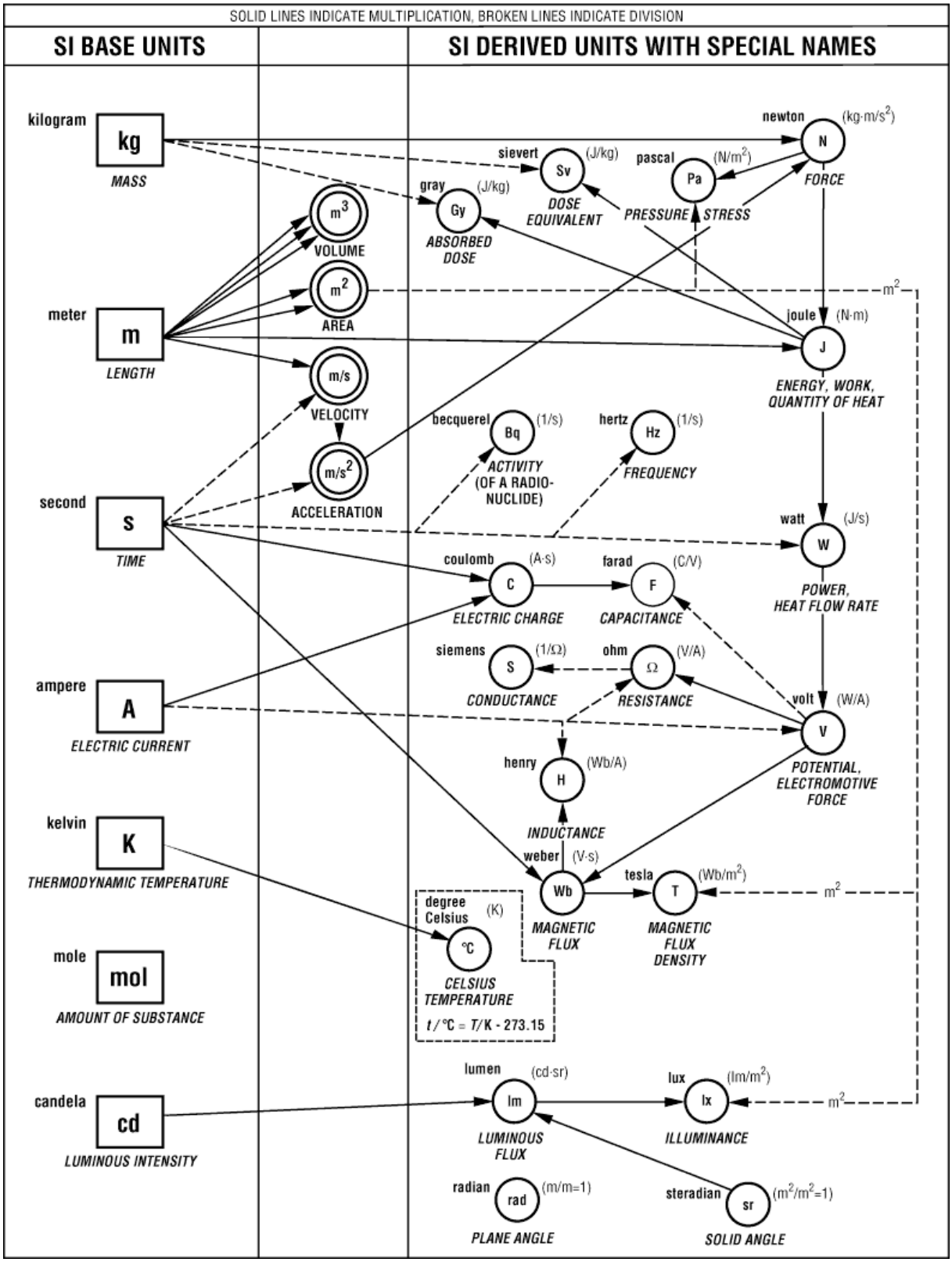
Certaines unités résultent de la combinaison par multiplication ou division d'unités plus élémentaires. Nous les notons à la manière des exemples suivants : W/m^2 (watt par mètre carré). Certains auteurs utilisent la notation avec exposants négatifs. L'exemple précédent serait noté $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$. Autre exemple : le kilowatt · heure, l'unité pratique bien connue d'énergie électrique. Elle est le produit d'une puissance exprimée en kilowatt (kW) et d'un temps exprimée ici en heure (h).

Pour écrire le symbole de l'unité kilowatt · heure, on composera : kWh.



Pour marquer le produit, nous utilisons le point de la multiplication « · » et non le point décimal « . ». Cette notation évite les ambigüités de certains préfixes. Ainsi « mm » signifie bien « millimètre » (préfixe « milli », 10^{-3}, devant le symbole du mètre « m »), et non le produit de deux longueurs qu'on noterait « m · m », c'est-à-dire « m^2 ». C'est ce même point de la multiplication que nous utilisons également lorsque nous indiquons un nombre très petit ou très grand avec la notation scientifique, comme par exemple le *nombre d'Avogadro* : $N_A = 6{,}02214 \cdot 10^{23}\ \text{mol}^{-1}$. Ici la notation « mol^{-1} » signifie « par mol ». Pour être conforme aux règles indiquées ci-dessus, ceci devrait être noté « /mol ». L'absence d'unité au numérateur rend la notation peu lisible. Dans ces rares cas, nous préférons utiliser des exposants négatifs.

RELATIONSHIPS OF THE SI DERIVED UNITS WITH SPECIAL NAMES AND THE SI BASE UNITS



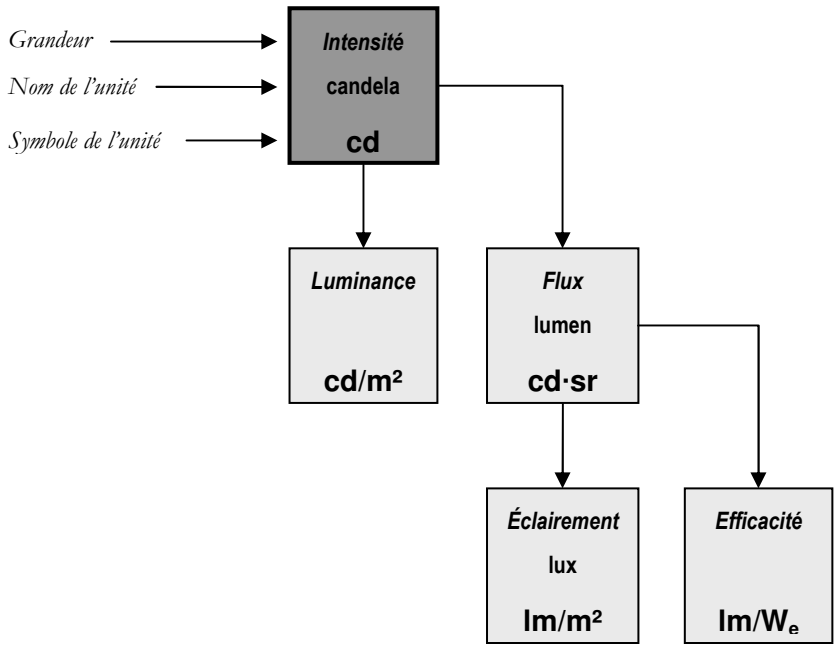
(DR).

Grandeurs et unités photométriques

Les grandeurs photométriques occupent une place un peu à part. En effet, bien que la définition de la candela, unité fondamentale du système SI, soit exprimée de manière rigoureuse du point de vue physique, il n'en demeure pas moins que l'objectif de la photométrie est de proposer une série de grandeurs permettant de caractériser le plus précisément possible la sensation visuelle d'un observateur humain. Le tableau suivant présente ces grandeurs et les unités associées. Voyons voir…

Grandeur	Unité	Symbole	Description
Intensité lumineuse	Candela	cd	Unité fondamentale du SI. La candela est l'intensité lumineuse dans une direction donnée d'un rayonnement monochromatique de fréquence $5{,}40 \cdot 10^{14}$ Hz (ceci correspond à une longueur d'onde de 555 nm) dont l'intensité énergétique dans cette direction est de 1/683 W/sr.
Luminance		cd/m^2	Grandeur définie en un point d'une surface et dans une certaine direction. Est égale au quotient de l'intensité du rayonnement dans la direction considérée par l'élément de surface considéré.
Flux lumineux	Lumen	lm	Unité SI. *Lumen* : mot latin signifiant « lumière ». Flux lumineux envoyé par une source isotrope d'intensité une candela à l'intérieur d'un angle solide de un stéradian. $1\ lm = 1\ cd \cdot sr.$
Éclairement lumineux	Lux	lx	Quotient du flux lumineux par l'aire de la surface réceptrice. $1\ lx = 1\ lm/m^2.$
Efficacité lumineuse		lm/W_e	Caractérise une source électrique. Rapport du flux lumineux produit par la puissance électrique absorbée.

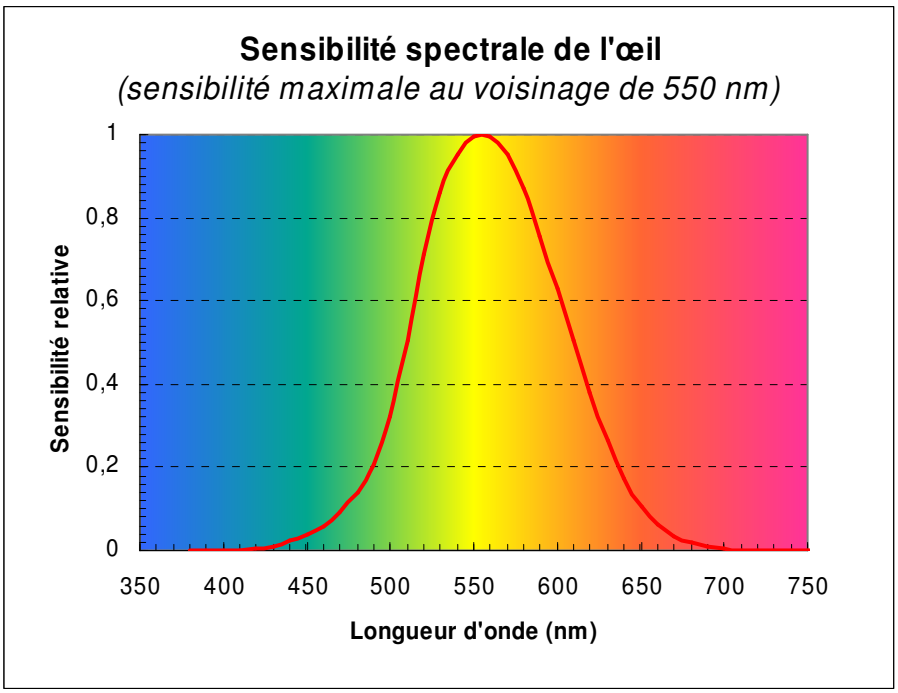
Comme le montre ce tableau, une hiérarchie existe entre ces grandeurs photométriques et donc entre les unités correspondantes. Le schéma suivant explicite ces relations.



Dans la définition de la candela, on notera que le rayonnement monochromatique à la fréquence de 540.10^{12} hertz correspond à la sensibilité maximale de l'œil. Il est plus fréquent de désigner un rayonnement par sa longueur d'onde λ. La longueur d'onde est donnée par la relation suivante $\lambda = c/f$ dans laquelle f est la fréquence du rayonnement et c la célérité de la lumière (299 792 458 m/s). Dans le cas présent, on trouve $\lambda = 555$ nm.

La Commission internationale de l'éclairage (CIE) a défini deux fonctions $V(\lambda)$ et $V'(\lambda)$ correspondant respectivement à la sensibilité relative spectrale de l'œil humain en *vision photopique* (adaptée à la lumière) et *scotopique* (adaptée à l'obscurité) .

Le graphe suivant représente la fonction d'*efficacité lumineuse relative spectrale* pour la vision photopique.



C'est cette fonction qui est intégrée dans les appareils de mesure du type luxmètre afin de traduire des mesures énergétiques en mesures photométriques.

On appelle *photométrie* la branche de la métrologie consacrée à la mesure des grandeurs photométriques.

Il existe une relation très utile entre la *luminance* L d'une surface diffusante et réfléchissante, et le l'*éclairement* E (en lx) qu'elle reçoit : $L = E \cdot \rho/\pi$, dans laquelle ρ est le facteur de réflexion. Dans la formule précédente, la valeur numérique π à la dimension d'un angle solide (en sr).

Bibliographie commentée

Comme toutes les bibliographies, celle-ci résulte d'un choix dont il serait vain de nier la subjectivité. La sélection d'ouvrage que nous avons opérée s'est fondée sur diverses motivations dont la moindre n'est pas notre admiration pour l'ouvrage choisi et son auteur. Les livres cités nous accompagnent, pour certains, depuis de très nombreuses années. Ajoutons que nous n'avons pas voulu limiter cette liste à des ouvrages de pure physique, mais l'ouvrir, ne fusse que symboliquement, à des champs comme l'architecture ou l'anthropologie qui ont aussi beaucoup à nous dire pour nous aider à comprendre l'univers dans lequel nous vivons. Par commodité, nous avons adopté un classement par ordre alphabétique des auteurs.

[ATKINS, 1987] ATKINS (P. W.). – *Chaleur et désordre – Le deuxième principe de la thermodynamique*, Pour la Science, Paris, 1987.

Un très sérieux livre de physique qui se lit comme un roman ! C'est le genre d'ouvrage qu'on regrette de n'avoir pas lu plus tôt. Il y a deux sortes de lecteurs : ceux qui ont la chance de l'avoir déjà lu et ceux qui ont la chance de bientôt le lire.

[BANHAM, 1969] BANHAM (R.). – *The architecture of the well-tempered environment*, The Architectural Press, London, 1969.

Professeur d'histoire de l'architecture, Reyner Banham a fait appel à sa grande connaissance des mouvements culturels contemporains pour analyser l'influence des techniques modernes de contrôle de l'environnement intérieur sur l'approche conceptuelle des architectes et la construction des bâtiments.

[BERDUCOU, 1990] BERDUCOU (M.). coord. – *La conservation en archéologie – Méthodes et pratiques de la conservation-restauration des vestiges archéologiques*, Masson, Paris, 1990.

Ce livre a un seul défaut : il est épuisé ! Pour le reste, on ne saurait en dire trop de bien, sauf à être suspect de complaisance pour les auteurs de cette somme qui se veut un effort collectif d'unification des champs conceptuels dans un domaine complexe faisant appel à de nombreux savoirs et savoir-faire. À noter la très complète bibliographie qu'une nouvelle édition de l'ouvrage, que nous appelons de nos vœux, ne manquerait pas de réactualiser.

[BRUCE, 1998] BRUCE (C.). – *L'étrange affaire du chat de Mme Hudson...*, Flammarion, Paris, 1998.

Sans doute les raisons du choix de cet ouvrage apparaîtront-elles plus évidentes si nous précisons la fin du titre : « …*et autres nouvelles policières résolues grâce aux progrès de la physique* ». Nous ne saurions trop recommander la lecture de ce livre dans lequel l'auteur, physicien et écrivain vivant à Oxford, fait revivre un Sherlock Holmes au fait des dernières découvertes de la physique ! Le faussement naïf docteur Watson est toujours là, bien sûr, découvrant sous la férule amicale de son maître et ami, les beaux mystères de la conservation de l'énergie et de la relativité.

[CAMUFFO, 1998] CAMUFFO (D.). – *Microclimate for Cultural Heritage*, Elsevier, Amsterdam, 1998.

L'un des rares ouvrages scientifiques centrés sur les questions de conservation des biens patrimoniaux. On peut déplorer que l'auteur n'utilise pas systématiquement le système d'unités SI. Ce choix curieux contraint le lecteur à quelques conversions fastidieuses. Pour amateur confirmé de formules mathématiques.

[CASSAR, 1995] CASSAR (M.). – *Environmental Management – Guidelines for Museums and Galleries*, Routledge, London, 1995.

Dans cet ouvrage, May Cassar s'intéresse moins aux questions théoriques qu'aux aspects pratiques de la gestion environnementale appliquée aux établissements patrimoniaux.

[GENNES, 2002] GENNES (P.-G. DE), BROCHARD-WYART (F.), QUÉRÉ (D.). – *Gouttes, bulles, perles et ondes*, Belin, Paris, 2002.

Cet ouvrage scientifique marqué par le talent pédagogique de Pierre-Gilles de Gennes (prix Nobel de physique 1991) va sans doute devenir un classique pour tous les phénomènes relatifs aux interfaces : capillarité, mouillage, démouillage, etc.

[GIVONI, 1978] GIVONI (B.). – *L'homme, l'architecture et le climat*, Éditions du Moniteur, Paris, 1978.

Architecte et docteur en médecine, B. Givoni a élaboré un ouvrage très complet où l'analyse détaillée du comportement de l'homme dans des espaces à climat contrôlé voisine avec une présentation très complète de la thermo-hygrométrie des bâtiments.

[HARKNESS, 1978] HARKNESS (E. L.), MEHTA (M. L.). – *Solar radiation control in buildings*, Applied Science Publishers, London, 1978.

Plus technique que le livre des frères Olgyay [OLGYAY, 1957], cet ouvrage en constitue un bon complément. Les auteurs se sont attachés à proposer une méthode d'analyse permettant à tout concepteur d'élaborer rationnellement des solutions aux questions de protection solaire des façades qu'il rencontre.

[HUFTY, 2001] HUFTY (A.). – *Introduction à la climatologie*, Les Presses de l'Université de Laval, Laval, 2001.

L'étude des climats est une discipline exigence qui nécessite d'aborder de nombreux champs de la physique. Cet ouvrage constitue un exposé clair mais néanmoins rigoureux de la climatologie et de ses divers domaines. Parfaitement illustré, il demeure essentiellement descriptif et évite un recours systématique à l'appareil mathématique. Pour ceux qui veulent aller plus loin, l'auteur propose une bibliographie riche de plus de 700 références.

[LAVÉDRINE, 2000] LAVÉDRINE (B.). – *Les collections photographiques – Guide de conservation préventive*, Arsag, Paris, 2000.

Bien que l'objet de cet ouvrage soit limité à la préservation des collections photographiques, on peut y trouver de nombreuses informations relatives à l'environnement climatique qu'il est aisé de

transposer à d'autres domaines.

[LEROI-GOURHAN, 1945] LEROI-GOURHAN (A.). – *Milieu et techniques*, Albin Michel, Paris, 1945.

Parce qu'il est entraîné à l'observation de signes ténus mais signifiants, le regard de l'anthropologue sait lire dans nos pratiques quotidiennes la trace des contraintes économiques, sociales et culturelles qui les sous-tendent. André Leroi-Gourhan possède l'art et la manière d'éclairer notre compréhension de l'histoire des civilisations au travers d'un exposé toujours inspiré. À cet égard, le chapitre consacré à l'habitation est exemplaire.

[LORUSSO, 1995] LORUSSO (S.), SCHIPPA (B.). – *La méthodologie scientifique appliquée à l'étude des biens culturels – Diagnostic et évaluation technico-économique*, traduit de l'italien par Marcel Stefanaggi, Erec, Paris, 1995.

En réalisant la traduction de cet ouvrage, M. Stefanaggi, chef de laboratoire au LRMH a fait œuvre utile car on ne trouvait pas dans la littérature spécialisée française, d'ouvrage de synthèse sur les méthodes scientifiques utilisables dans le domaine de l'étude et de la conservation des biens culturels. L'essentiel de l'ouvrage est consacré à la présentation des très nombreuses techniques disponibles en laboratoire. Des références bibliographiques sont ajoutées à la fin de chaque partie. Figure également dans l'ouvrage une liste (qu'il conviendrait sans doute aujourd'hui d'actualiser) de bases de données spécialisées dans les domaines de l'art et de l'archéologie.

[MARSTON, 1972] MARSTON FITCH (J.). – *American building - The environmental forces that shape it*, Houghton Mifflin Company, Boston, 1972.

L'homme ne peut pas survivre dans la nature sans déployer un arsenal minimal de moyens de protection. La fonction première de l'architecture est d'offrir une médiation entre l'homme et les forces naturelles souvent hostiles. Telle est la thèse fondamentale de cet ouvrage bien construit dont le titre est cependant trop restrictif eu égard à son plus vaste propos.

[OLGYAY, 1957] OLGYAY (A.), OLGYAY (V.). – *Solar control and shading devices*, Princeton University Press, Princeton, 1957.

Signé par les frères Olgyay, cet ouvrage a souvent été imité mais jamais égalé. Riche de très nombreux exemples, illustré de photos et dessins de détail tirés des meilleures œuvres architecturales contemporaines, il constitue, un demi-siècle plus tard, une somme incomparable de références toujours actuelles pour les constructeurs d'aujourd'hui.

[OLGYAY, 1963] OLGYAY (V.). – *Design with climate*, Princeton University Press, Princeton, 1963.

Le propos de l'auteur est tout dans le sous-titre qu'il a donné à son ouvrage : "Bioclimatic approach to architectural regionalism". Plus de trente après sa publication, cet ouvrage constitue encore la référence pour tous les professionnels qui souhaitent construire des bâtiments en harmonie avec le climat.

[RAPOPORT, 1972] RAPOPORT (A.). – *Pour une anthropologie de la maison*, Collection

« Aspects de l'urbanisme », Dunod, Paris, 1972.

À la frontière de l'ethnologie, de la sociologie et même de la psychologie, cet ouvrage étudie l'ensemble des facteurs influant sur la conception des espaces d'habitation mais qu'il est aisé d'extrapoler aux autres constructions. En universitaire aguerri, Amos Rapoport conclut son livre par une bibliographie très complète de plus de 300 références.

[RUDOFSKY, 1971] RUDOFSKY (B.). – *The prodigious Builders*, Harvest/HBJ Book, New York, 1971.

Bernard Rudofsky s'était fait connaître par un premier ouvrage intitulé malicieusement Architecture without architects (Doubleday, New York, 1964) publié à l'occasion d'une mémorable exposition organisée par le Museum of Modern Art de New York. Avec ce nouvel ouvrage, B. Rudofsky reprend et élargit son thème d'étude de prédilection. Le lecteur y trouvera un recueil très complet des formes les plus libres de l'architecture vernaculaire inventées à travers le temps et sous toutes les latitudes. On y trouvera de merveilleux exemples de contrôle « passif » du climat (entendez sans équipements techniques) dans des régions du monde où les météores (voir ce mot dans le lexique) se manifestent sous des formes extrêmes.

[THOMSON, 1986] THOMSON (G.). – *The Museum Environment*, 2nd edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, 1986.

Vingt ans après la publication de sa deuxième édition, ce grand classique demeure une source très riche d'informations. Pour le lecteur, la surprise vient de la structure originale de l'ouvrage. Les trois premiers chapitres sont consacrés respectivement à la lumière, à l'humidité et à la pollution. Curieusement, les trois chapitres suivants portent sur les mêmes thèmes ! De fait, ils constituent des compléments plus techniques des premiers chapitres. L'ouvrage ne comporte pas moins de 321 références bibliographiques.

[TORRACA, 1986] TORRACA (G.). – *Matériaux de construction poreux – Science des matériaux pour la conservation architecturale*, Iccrom, Rome, 1986.

L'ambition de l'ouvrage est limitée mais l'auteur, contrairement à d'autres, en donne plus qu'il n'en promet ! Sous des dehors modestes, l'ouvrage propose en effet, une approche réellement pluridisciplinaire d'un sujet difficile. En 140 pages, l'essentiel est dit.

Index

« Trouver d'abord. Chercher après. »

Jean COCTEAU. – *Journal d'un inconnu*, Grasset, Paris, 1953, p. 20

Index des notions

A

ABSORPTION 6
Absorptivité ..... → Absorption
Accélération de la pesanteur ..... → Pesanteur
ACIDE 6
Acidité ..... → Potentiel hydrogène
ACTIVITÉ DE L'EAU 7
Activité nucléaire ..... → Radioactivité
ADHÉSION 7
Adiabatique ..... → Système
Adsorbant ..... → Adsorption
ADSORPTION 7
AÉROSOL 8
AIR 8
AIR HUMIDE 9
Air sec ..... → Air
Alcalinité ..... → Base
Amorphe ..... → Solide
Analyse dimensionnelle ..... → Dimension
Analyse spectrale ..... → Spectre
Angle ..... → Radian
Angle solide ..... → Stéradian
Anion ..... → Ion
Anisotrope ..... → Solide
Arrhenius (Loi d') ..... → Énergie d'activation
ATMOSPHÈRE 9
Atmosphère standard ..... → Atmosphère
ATOME 10
Avogadro (Loi de) ..... → Volume molaire
Avogadro (Nombre d') ..... → Quantité de matière
AZIMUT 12

B

BASE 13
Basicité ..... → Potentiel hydrogène
Biochimie ..... → Chimie
Blanc ..... → Couleur
Boltzmann (Constante de) ..... → Entropie
Boltzmann (Loi de) ..... → Entropie
Bosons intermédiaires ..... → Forces fondamentales
Boyle-Mariotte (Loi de) ..... → Gaz parfait
BROUILLARD 13

C

Capacité calorifique ..... → Chaleur massique
Capacité thermique ..... → Chaleur massique
CAPILLARITÉ 13
CATALYSEUR 14
Catalyseur hétérogène ..... → Catalyseur
Catalyseur homogène ..... → Catalyseur
Cation ..... → Ion
Célérité ..... → Lumière
CHALEUR 14
CHALEUR LATENTE 15
CHALEUR MASSIQUE 15
CHALEUR SENSIBLE 15
CHAMP 15
Champ scalaire ..... → Champ
Champ vectoriel ..... → Champ
CHANGEMENT D'ÉTAT 16
Charbon actif ..... → Filtration
Charles (Loi de) ..... → Gaz parfait
CHIMIE 18
Chimie générale ..... → Chimie
Chimie minérale ..... → Composé organique
Chimie minérale ..... → Chimie
Chimie organique ..... → Composé organique
Chimie organique ..... → Chimie
Chimie physique ..... → Chimie
Chimisorption ..... → Adsorption
Cinétique réactionnelle ..... → Énergie d'activation
CLIMAT 18
CLIMATOLOGIE 19
Coefficient de diffusion ..... → Diffusion
COHÉSION 19
COLLOÏDES 19
Colorimétrie ..... → Couleur
COMPOSÉ ORGANIQUE 20
Composé organique volatil ..... → Composé organique
Concentration ..... → Solution
CONDENSATION 21
Condensation liquide ..... → Condensation
Condensation solide ..... → Condensation
CONDITIONS AUX LIMITES 21
CONDITIONS NORMALES 21
CONDUCTION 21
Conduction électronique ..... → Électrolyte
Conduction ionique ..... → Électrolyte
Conductivité thermique ..... → Conduction
Congélation ..... → Solidification
Constante de désintégration ..... → Radioactivité
Constante de temps ..... → Thermomètre
Constante des gaz parfaits ..... → Gaz parfait
CONTENU EN EAU 22
CONVECTION 22
Convection forcée ..... → Convection
Convection naturelle ..... → Convection
Copolymère ..... → Polymère
COULEUR 23
COV ..... → Composé organique
Cristal ..... → Solide
Cryodessication ..... → Sublimation

D

Dalton (Loi de) → Pression partielle
Debye (Forces de) → Van der Waals (Forces de)
Décroissance radioactive → Radioactivité
Degré de saturation → Degré hygrométrique
DEGRÉ HYGROMÉTRIQUE 24
Démouillage → Mouillabilité
Densité de flux → Flux
Densité particulaire normale → Libre parcours moyen
Désorption → Adsorption
Diagramme de l'air humide → Diagramme psychrométrique
Diagramme de phase → Changement d'état
DIAGRAMME PSYCHROMÉTRIQUE 24
DIÉLECTRIQUE 25
DIFFUSION 25
DILATATION 27
DIMENSION 27
DISPERSION 28
Dissociation électrolytique → Électrolyte
Dissociation ionique → Électrolyte
Domaine hypercritique → Changement d'état
DYNAMIQUE 29

E

EAU 29
ÉBULLITION 30
Échelle Celsius → **Les échelles thermométriques**
Échelle Fahrenheit → **Les échelles thermométriques**
Échelle Rankine → **Les échelles thermométriques**
Échelle Réaumur → **Les échelles thermométriques**
Éclairement lumineux → **Grandeurs photométriques**
Écoulement laminaire → Pression statique
Effet de serre → Rayonnement thermique
Effet Venturi → Pression statique
Efficacité lumineuse → **Grandeurs photométriques**
Efficacité lumineuse relative spectrale → **Grandeurs photométriques**
ÉLECTROLYTE 31
Électrométéore → Météore
Électron → Atome
ÉLÉMENT 31
Émulsifiant → Émulsion
ÉMULSION 32
Endothermique → Changement d'état
ÉNERGIE 32
Énergie chimique → Énergie potentielle
ÉNERGIE CINÉTIQUE 33
ÉNERGIE D'ACTIVATION 33
Énergie d'ionisation → Molécule
Énergie électrique → Énergie potentielle
Énergie gravitationnelle → Énergie potentielle
Énergie nucléaire → Énergie potentielle
ÉNERGIE POTENTIELLE 33
Énergie thermique → Chaleur
ENTHALPIE MASSIQUE 33
ENTROPIE 34
Enzyme → Catalyseur
ÉQUATION 34
ÉQUATION D'ÉTAT 35
Équation des gaz parfaits → Gaz parfait
ÉQUILIBRE 35
ESPACE 35
Espace-temps → Espace
ÉTAT 36
ÉVAPORATION 36
Exothermique → Condensation
Extensive → Grandeur

F

FILTRATION 36
Filtration chimique → Filtration
Filtration physique → Filtration
Filtre fin → Filtration
Filtre grossier → Filtration
Filtre HEPA → Filtration
Filtre ULPA → Filtration
Floculation → Colloïde
FLUIDE 39
FLUX 39
Flux électrique → Flux
Flux lumineux → **Grandeurs photométriques**
Flux magnétique → Flux
Flux thermique → Flux
FONCTION 39
FORCE 39
FORCES FONDAMENTALES 40
Fourier (Loi de) → Conduction
Fréquence → Onde
FRONTIÈRE 41
FUSION 41

G

Gay-Lussac (Loi de) → Gaz parfait
GAZ 41
GAZ PARFAIT 42
Gluon → Forces fondamentales
GRADIENT 43
GRANDEUR 43
Grandeur extensive → Grandeur
Grandeur intensive → Grandeur
Grandeur scalaire → Champ
Grandeur scalaire → Grandeur
Grandeur vectorielle → Grandeur, → Champ
Gravité → Pesanteur
Graviton → Forces fondamentales

H

HAUTEUR 44
HUMIDITÉ ABSOLUE 44
HUMIDITÉ DE L'AIR 44
HUMIDITÉ RELATIVE 45
HUMIDITÉ SPÉCIFIQUE 46
HYDROGÈNE 46
HYDROLYSE 47
Hydrométéore → Météore
HYDROPHILE 47
HYDROPHOBE 47
Hygromètre → Hygrométrie

HYGROMÉTRIE ... 47
HYGROSCOPICITÉ ... 48
HYSTÉRÉSIS ... 49

I

Incandescence ... → Lumière
Inerte ... → Inertie
INERTIE ... 49
Inertie chimique ... → Inertie
Inertie mécanique ... → Inertie
Inertie thermique ... → Inertie
Infrarouge ... → Rayonnement électromagnétique
Intensité lumineuse ... → **Grandeurs photométriques**
Intensive ... → Grandeur
Interaction électromagnétique ... → Forces fondamentales
Interaction faible ... → Forces fondamentales
Interaction forte ... → Forces fondamentales
Interaction gravitationnelle ... → Forces fondamentales
Interaction hydrophobe ... → Hydrophobe
ION ... 50
Ion hydroxyle ... → Potentiel hydrogène
Ionisation ... → Ion
Isolant ... → Isolation
ISOLATION ... 50
Isolation électrique ... → Isolation
Isolation thermique ... → Isolation
Isotherme de sorption ... → Contenu en eau
Isotope ... → Atome
Isotrope ... → Solide

J

Jurin (Loi de) ... → Capillarité

K

Keesom (Forces de) ... → Van der Waals (Forces de)

L

Liaison chimique ... → Molécule
Liaison covalente ... → Molécule
LIAISON HYDROGÈNE ... 50
Liaison ionique ... → Molécule
LIBRE PARCOURS MOYEN ... 51
Limite colloïdale ... → Colloïde
Lipophile ... → Hygrophile
LIQUÉFACTION ... 52
LIQUIDE ... 52
Lithométéore ... → Météore
Loi physique ... → Physique
London (Forces de) ... → Van der Waals (Forces de)
LONGUEUR ... 53
Longueur d'onde ... → Onde
Loschmidt (Nombre de) ... → Libre parcours moyen
LUMIÈRE ... 53
Luminance ... → **Grandeurs photométriques**
Luminescence ... → Lumière
Lyophilisation ... → Sublimation

M

Macropore ... → Porosité
MASSE ... 54
MASSE MOLAIRE ... 54
MASSE VOLUMIQUE ... 55
MATÉRIAU ... 55
MATIÈRE ... 55
Mélange gazeux ... → Pression partielle
Mendeleïev (Table de) ... → Élément
Ménisque ... → Capillarité
Mésopore ... → Porosité
MÉTÉORE ... 56
Météorite ... → Météore
MÉTÉOROLOGIE ... 56
MÉTROLOGIE ... 56
Micropore ... → Porosité
Milieu dispersé ... → Dispersion
MODÈLE ... 57
Modèle standard ... → Forces fondamentales
Molalité ... → Solution
Molarité ... → Solution
Mole ... → Quantité de matière
MOLÉCULE ... 57
Molécule polaire ... → Van der Waals (Forces de)
Mollier (Abaque de) ... → Diagramme psychrométrique
Moment dipolaire ... → Eau
Monomère ... → Polymère
MOUILLABILITÉ ... 57
Mouillage ... → Mouillabilité
MOUVEMENT BROWNIEN ... 58

N

Nanopore ... → Porosité
Neutron ... → Atome
Noir ... → Couleur
NOMBRE ... 59
Nombre de masse ... → Atome
Nombres complexes ... → Nombre
Nombres entiers naturels ... → Nombre
Nombres entiers relatifs ... → Nombre
Nombres rationnels ... → Nombre
Nombres réels ... → Nombre
Noyaux de condensation ... → Aérosol
NUAGE ... 59
Nucléide ... → Atome
Nucléon ... → Atome
Numéro atomique ... → Atome

O

ONDE ... 59
Onde électromagnétique ... → Onde
Onde matérielle ... → Onde
OZONE ... 60

P

Période ... → Onde
Période radioactive ... → Radioactivité
PÉRIODIQUE ... 61

PERMANENT 61
PERMÉABILITÉ 61
Permittivité relative ..... → Diélectrique
PESANTEUR 61
pH → Potentiel hydrogène
PHASE 62
Phase continue ..... → Colloïde
Phase dispersée ..... → Colloïde
Phosphorescence ..... → Lumière
Photométéore ..... → Météore
Photométrie ..... → **Grandeurs photométriques**
Photon ..... → Rayonnement électromagnétique
PHYSIQUE 62
Physisorption ..... → Adsorption
Planck (Constante de) ..... → Rayonnement électromagnétique
Plasma ..... → État
POIDS 63
Point critique ..... → Changement d'état
Point triple ..... → Changement d'état
Polychromatique ..... → Rayonnement thermique
POLYMÈRE 64
Polymérisation ..... → Polymère
Pore ..... → Porosité
Porométrie ..... → Porosité
POROSITÉ 64
Porosité fermée ..... → Porosité
Porosité ouverte ..... → Porosité
POTENTIEL HYDROGÈNE 65
PRESSION 66
PRESSION ATMOSPHÉRIQUE 66
Pression atmosphérique normale ..... → Pression atmosphérique
PRESSION DE VAPEUR SATURANTE 67
PRESSION DYNAMIQUE 68
Pression isotrope ..... → Pression statique
Pression normale ..... → Conditions normales
PRESSION PARTIELLE 68
PRESSION STATIQUE 69
PRESSION TOTALE 69
Principes de la thermodynamique ..... → Thermodynamique
Proton ..... → Atome
PSYCHROMÈTRE 70
PUISSANCE 70

Q

QUANTITÉ DE MATIÈRE 70
Quark ..... → Atome

R

RADIAN 71
RADIOACTIVITÉ 71
Radioélément ..... → Radioactivité
Radionucléide ..... → Radioactivité
Radon ..... → Radioactivité
RAPPORT DE MÉLANGE 73
RAYONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE 74
Rayonnement infrarouge ..... → Rayonnement électromagnétique
RAYONNEMENT THERMIQUE 75
Rayonnement ultraviolet ..... → Rayonnement électromagnétique
Rayonnement visible → Rayonnement électromagnétique
Rayonnement a ..... → Radioactivité
Rayonnement β ..... → Radioactivité
Rayonnement γ ..... → Radioactivité
RÉACTION CHIMIQUE 77
Réflectivité ..... → Absorption
RÉGIME 77
RÉGULATION 77

S

SATURATION 78
Scalaire ..... → Champ
Sélectivité spectrale ..... → Absorption
SIMULATION 78
SOL 79
SOLIDE 79
SOLIDIFICATION 80
Solubilité ..... → Solution
SOLUTÉ 80
SOLUTION 80
Solution saturée ..... → Solution
SOLVANT 81
SPECTRE 81
Spectre continu ..... → Spectre
Spectre discontinu ..... → Spectre
Spectre visible ..... → Spectre
STATIQUE 81
STÉRADIAN 82
Stratosphère ..... → Atmosphère
SUBLIMATION 82
Supersaturation ..... → Solution
Surface ..... → Longueur
Surface spécifique ..... → Porosité
SYSTÈME 82
Système de coordonnées ..... → Espace
Système fermé ..... → Système
SYSTÈME INTERNATIONAL D'UNITÉS 83
Système isolé ..... → Système
Système métrique ..... → Système International d'unités
Système ouvert ..... → Système
Système SI ..... → Système International d'unités

T

Tableau périodique des éléments ..... → Élément
Tableau périodique des éléments ..... → Élément
Tamis moléculaires ..... → Zéolithe
TEMPÉRATURE 84
Température absolue ..... → Température absolue
TEMPÉRATURE ABSOLUE 84
Température de consigne ..... → Régulation
TEMPÉRATURE DE RAYONNEMENT 85
TEMPÉRATURE DE ROSÉE 85
Température de transition vitreuse ..... → Transition vitreuse
TEMPÉRATURE HUMIDE 85
Température normale ..... → Conditions normales
Température opérative ... → Température de rayonnement
Température radiative ... → Température de rayonnement
TEMPÉRATURE SÈCHE 86

TEMPS 86
Teneur en humidité ..... → Contenu en eau
Tensioactif ..... → Hygrophile
TENSION SUPERFICIELLE 86
Théorie cinétique des gaz ..... → Pression statique
THERMODYNAMIQUE 87
Thermodynamique chimique ..... → Chimie
THERMOMÈTRE 88
Thermométrie ..... → Thermomètre
Thermoscope ..... → Thermomètre
Torricelli (Tube de) ..... → Pression atmosphérique
Transition de phase ..... → Changement d'état
TRANSITION VITREUSE 89
TRANSITOIRE 89
Transmissivité ..... → Absorption
Transuranien ..... → Élément, → Atome
TRAVAIL 89
Troposphère ..... → Atmosphère

U

Ultraviolet ..... → Rayonnement électromagnétique
UNITÉ 89
Unité de base ..... → Système International d'unités
Unité dérivée ..... → Système International d'unités

V

VAN DER WAALS (FORCES DE) 90
VAPEUR 91
Vapeur saturante ..... → Vapeur
Vapeur sèche ..... → Vapeur
VAPORISATION 91
Variable ..... → Fonction
Variable d'état ..... → Équation d'état
VARIÉ 91
Vecteur ..... → Champ
VIDE 91
Vie moyenne ..... → Radioactivité
VISCOSITÉ 92
Vision photopique ..... → **Grandeurs photométriques**
Vision scotopique ..... → **Grandeurs photométriques**
Vitesse de la lumière ..... → Masse
Volume ..... → Longueur
VOLUME MASSIQUE 92
VOLUME MOLAIRE 92

W

Wien (Loi de) ..... → Rayonnement thermique

Z

ZÉOLITHE 93
Zéro absolu ..... → Température

Index des traductions

A

Absolute humidity 44
Absolute temperature 84
Absorption 6
Acid 6
Activation energy 33
Activity 7
Adhesion 7
Adsorption 7
Aerosol 8
Air 8
Air humidity 44
Altitude angle 44
Atmosphere 9
Atmospheric pressure 66
Atom 10
Azimuth 12

B

Base 13
Boiling 30
Boundary 41
Boundary conditions 21
Brownian motion 58

C

Capillarity 13
Catalyst 14
Change in phase (or state) 16
Chemical reaction 77
Chemistry 18
Climate 18
Climatology 19
Cloud 59
Cohesion 19
Colloids 19
Color 23
Condensation 21, 52
Conduction 21
Control 77
Convection 22

D

Deposition 21
Dew point temperature 85
Dielectric 25
Diffusion 25
Dilatation 27
Dimension 27
Dispersion 28
Dry-bulb temperature 86
Dynamic pressure 68

E

Electrolyte 31
Element 31
Emulsion 32
Energy 32
Entropy 34
Equation 34
Equation of state 35
Equilibrium 35
Evaporation 36

F

Field 15
Filtration 36
Fluid 39
Flux 39
Fog 13
Force 39
Freezing 80
Function 39
Fundamental interactions 40
Fusion 41

G

Gas 41
Glass transition 89
Gradient 43
Gravity 61

H

Heat 14
Humid air 9
Humidity percentage 24
Humidity ratio 73
Hydrogen 46
Hydrogen bond 50
Hydrolysis 47
Hydrophilic 47
Hydrophobic 47
Hygrometry 47
Hygroscopicity 48
Hysteresis 49

I

Ideal gas 42

Inertia 49
Ion 50
Isolation 50

K

Kinetic energy 33

L

Latent heat 15
Length 53
Light 53
Liquefaction 52
Liquid 52

M

Mass 54
Mass enthalpy 33
Material 55
Matter 55
Mean free path 51
Melting 41
Meteorological phenomenon 56
Meteorology 56
Metrology 56
Mixing ratio 73
Model 57
Moist air 9
Moisture content 22
Molar mass 54
Molar volume 92
Mole 70
Molecule 57

N

Number 59

O

Organic compound 20
Ozone 60

P

Partial pressure 68
Periodic 61
Permeability 61
pH 65
Phase 62
Physical quantity 43
Physics 62
Polymer 64
Porosity 64
Potential energy 33
Power 70
Pressure 66
Psychrometric chart 24

R

Radian 71
Radiant temperature 85
Radiation 74
Radioactivity 71
Relative humidity 45

S

Saturation 78
Saturation pressure 67
Sensible heat 15
Simulation 78
Sol 79
Solid 79
Solute 80
Solution 80
Solvent 81
Space 35
Specific heat 15
Specific humidity 46
Specific mass 55
Specific volume 92
Spectrum 81
Standard temperature and pressure 21
State 36
State 77
Static pressure 69
Steady 81
Steady state 61
Steradian 82
Sublimation 82
Surface tension 86
System 82

T

Temperature 84
Thermal radiation 75
Thermodynamics 87
Thermometer 88
Time 86
Total pressure 69
Transient state 89

U

Unit 89
Unsteady 91
Unsteady state 29

V

Vacuum 91
Van der Waals'forces 90
Vapor 91
Vaporisation 91
Viscosity 92

W

Water 29
Water activity 7
Water content 22
Wave 59
Weight 63
Wet-bulb temperature 85
Wetting 57
Work 89

Z

Zeolite 93

Index des scientifiques cités

Les références de page renvoient aux articles du lexique où figure un commentaire (même court) sur le scientifique cité. Ainsi AVOGADRO n'est cité que pour l'article « **VOLUME MOLAIRE** » et non pour l'ensemble des articles où la loi et le nombre qui portent son nom sont mentionnés. En revanche, Svante ARRHENIUS est cité deux fois nommément. Il apparaît donc deux fois dans l'index.

Pour l'orthographe des noms cités, nous avons retenu celle proposée par le *Petit Robert des noms propres*, Édition Le Robert, Paris, juin 1997. Pour les noms qui n'y figurent pas, nous avons consulté différentes sources et retenu l'orthographe la plus fréquente.

Å

ÅNGSTRÖM, Anders Jonas (1817-1874) 103

A

ARRHENIUS, Svante (1859-1927) 6, 31, 33
AVOGADRO, Amedeo (1776-1856) 92

B

BECQUEREL, Antoine Henri (1852-1908) 71
BERNOULLI, Daniel (1700-1782) 69
BOLTZMANN, Ludwig (1844-1906) 34
BROGLIE, Louis de (1892-1987) 74
BROWN, Robert (1773-1858) 58

C

CARNOT, Sadi (1796-1832) 87
CELSIUS, Anders (1701-1744) 84
CURIE, Marie Sklodowska (1867-1934) 71
CURIE, Pierre (1859-1906) 71

D

DALTON, John (1766-1844) 68
DESCARTES, René (1596-1650) 56

E

EINSTEIN, Albert (1879-1955) 54, 58, 74

F

FAHRENHEIT, Daniel (1686-1736) 99
FEYNMAN, Richard (1918-1988) 1
FOURIER, Jean-Baptiste Joseph (1768-1830) 21

G

GALILEI, Galileo [dit GALILÉE] (1564-1642) 88

H

HÉRON l'Ancien (Ier siècle de notre ère) 88
HERTZ, Heinrich Rudolf (1857-1894) 59
HOWARD, Luke (1772-1864) 59

J

JOULE, James Prescott (1818-1889) 32, 89
JURIN, James (1684-1750) 13

K

KELVIN, William THOMSON, sir (1824-1907) 84

L

LAVOISIER, Antoine Laurent de (1743-1794) 32, 83

M

MAXWELL, James (1831-1879) 15, 59
MENDELEÏEV, Dmitri Ivanovitch (1834-1907) .. 10, 31
MOLLIER, Richard (1863-1935) 24

N

NEWTON, Isaac (1643-1727) 39, 49, 61

P

PASCAL, Blaise (1623-1662) 66
PERRIN, Jean, (1870-1942) 58
PHILON de Byzance (IIIe siècle avant notre ère) 88
PLANCK, Max (1858-1947) 74

R

RANKINE, William (1820-1872) 100
RÉAUMUR, René Antoine FERCHAUD (1683-1757) .. 99
REGNAULT, Henri (1810-1878) 67
RUTHERFORD, Ernest (1871-1937) 71

S

SANTORIO, Santore (1561-1636) 88
SAUSSURE, Horace-Bénédict de (1740-1798) 47

T

TORRICELLI, Evangelista (1608-1647) 66

V

VAN DER WAALS, Johannes Diderik (1837-1923) 90
VENTURI, Giovanni Battista (1746-1822) 69

W

WATT, James (1736-1819) 70
WIEN, Wilhelm (1864-1928) 75

Note finale au lecteur

Rédigé dans le cadre d'un enseignement de DESS puis de MASTER, ce mémento est le résultat d'un effort permanent d'améliorations et de corrections. Je me suis efforcé de rédiger les notices du lexique de la façon la plus simple possible, sans notation mathématique (ou presque), tout en conservant cependant la rigueur la plus grande. Néanmoins, je n'exclus pas qu'il puisse subsister des manques, des imprécisions et même d'authentiques fautes et erreurs !

Pour poursuivre l'enrichissement de ce document, je vous serais reconnaissant de me faire part de vos réflexions, suggestions, critiques, propositions d'ajouts ou de modifications... D'une manière générale, toute participation, sous quelque forme qu'elle soit, sera la bienvenue. Le cas échéant, je vous remercie de m'adresser votre contribution à l'adresse suivante :

pierre.pedregal@conservationpreventive.com.

Merci d'avance pour vos prochains messages.

« Le gain de notre étude, c'est en être devenu meilleur et plus sage. »

Michel EYQUEM, seigneur de MONTAIGNE, *Essais*, Livre 1, 25, Firmin Didot, Paris, 1854, p. 65.